



Уральский  
федеральный  
университет

имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина

Уральский  
энергетический  
институт

# ОБМОТКИ ИНДУКЦИОННЫХ МАШИН ВРАЩАТЕЛЬНОГО И ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Учебное пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

# ОБМОТКИ ИНДУКЦИОННЫХ МАШИН ВРАЩАТЕЛЬНОГО И ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Рекомендовано методическим советом  
Уральского федерального университета  
в качестве **учебного пособия** для студентов вуза,  
обучающихся по направлению подготовки  
13.03.02 — Электроэнергетика и электротехника

Екатеринбург  
УрФУ  
2017

УДК 621.3.045(075.8)

ББК 31.26-044я73

О-19

Авторы:

С. А. Бычков, С. Л. Назаров, Ф. Е. Тарасов, В. Э. Фризен

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры «Энергетика» Технического университета УГМК В. С. Копырин;

канд. техн. наук, директор научно-технического центра ООО «Рэл-ИФ» (ГК «РЭЛТЕК») С. М. Фаткуллин

Научный редактор — д-р техн. наук, профессор Ф. Н. Сарапулов

О-19      Обмотки индукционных машин вращательного и поступательного движения / С. А. Бычков, С. Л. Назаров, Ф. Е. Тарасов, В. Э. Фризен. — Екатеринбург : УрФУ, 2017. — 80 с.

ISBN 978-5-321-02521-5

В учебном пособии рассмотрены основы построения обмоток индукционных (асинхронных) электрических машин. Приведена классификация обмоток, изложены способы описания магнитного поля обмоток. Особое внимание уделено особенностям построения и применения обмоток линейных индукционных машин.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 — Электроэнергетика и электротехника. Рекомендуется к изучению при выполнении магистерских диссертаций. Может быть полезно для инженеров — проектировщиков электрических машин.

Библиогр.: 12 назв. Табл. 2. Рис. 78.

УДК 621.3.045(075.8)

ББК 31.26-044я73

ISBN 978-5-321-02521-5

© Бычков С. А., Назаров С. Л.,  
Тарасов Ф. Е., Фризен В. Э., 2017  
© Уральский федеральный  
университет, 2017

---

# Оглавление

---

<b>1. Введение .....</b>	<b>4</b>
1.1. Принцип действия индукционных машин (ИМ) .....	4
1.2. Образование движущегося магнитного поля в ИМ.....	7
1.3. Классификация обмоток индукционных машин .....	11
1.4. Терминология описания обмоток переменного тока.....	13
<b>2. Магнитное поле реальных ИМ и способы их описания .....</b>	<b>16</b>
2.1. Постановка вопроса .....	16
2.2. Влияние конструкции обмоток на пространственное распределение магнитного поля в зазоре ИМ.....	19
2.3. Представление пульсирующего поля в виде двух вращающихся полей .....	24
2.4. НС трехфазной шестизонной обмотки .....	26
2.5. Особенности пространственного искажения магнитного поля ЛИМ .....	30
2.6. Временные искажения магнитного поля реальной ИМ .....	34
<b>3. Конструкции и свойства обмоток ИМ и ЛИМ .....</b>	<b>35</b>
3.1. Барабанные однослойные шаблонные обмотки.....	35
3.2. Барабанные однослойные концентрические обмотки .....	44
3.3. Двухслойные шаблонные обмотки.....	50
3.4. Двухслойные концентрические обмотки.....	59
3.5. Кольцевые обмотки ЛИМ .....	68
3.6. Особенности обмоток ЛИМ с разбегающимися и сбегающимися магнитными полями .....	73
Список библиографических ссылок.....	78

---

# 1. Введение

---

## 1.1. Принцип действия индукционных машин (ИМ)

---

Сущность процессов преобразования энергии в индукционной машине можно пояснить на следующей модели, представленной на рис. 1.1. Электромеханическое преобразование энергии требует среды такого преобразования — магнитного поля (источником которого является индуктор) и объекта, в котором происходит само преобразование — электрической цепи (якоря).

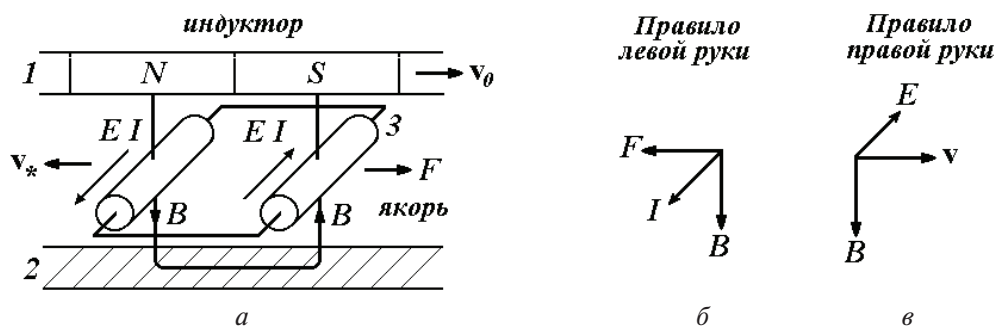


Рис. 1.1. Принцип действия индукционной машины

В качестве источника магнитного поля (индуктора) возьмем многополюсную (гетерополярную) систему постоянных магнитов 1, расположенных над обратным магнитопроводом, например стальной полосой 2. Такая магнитная система будет создавать знакопеременное магнитное поле в зазоре между постоянными магнитами и обратным магнитопроводом. Пространственный период магнитного поля индуктора определим значением  $2\tau$ , где  $\tau$  — величина полюсного деления.

В этот зазор поместим замкнутый проводящий контур (якорь) 3, который может свободно перемещаться вдоль него.

Приведем в движение индуктор с некоторой скоростью  $v_0$  (синхронной скоростью). Силовые линии магнитного поля станут перемещаться относительно проводников, индуцируя в них ЭДС движения. Найдем направления ЭДС движения, индуцируемые в проводниках якоря. Для этого воспользуемся правилом правой руки (рис. 1.1, б). Во избежание возможной ошибки необходимо вспомнить, что *правило правой руки определено только для случая движения проводника относительно поля*. В нашем случае — движения поля относительно проводника — применение этого способа возможно лишь при переходе в другую систему координат, неподвижную относительно поля индуктора. Такой переход требует введения скорости движения проводника относительно поля индуктора — относительной скорости  $v_*$ . Теперь, используя реальное направление относительной скорости проводников якоря, можно правильно определить направление ЭДС движения (рис. 1.1) и ее величину

$$E = Blv_* = |Blv_0|. \quad (1.1)$$

Видно, что в правом и левом проводниках эти ЭДС пространственно направлены встречно друг другу, а в контуре схемы замещения якорной цепи — согласно (рис. 1.1, а).

Возникновение ЭДС в замкнутой цепи приведет к появлению в ней тока якоря направление которого будет совпадать с направлением ЭДС, являющейся его причиной.

$$I = \frac{E}{Z}, \quad (1.2)$$

Появление тока в проводниках якоря, находящихся в магнитном поле индуктора, создает механическую силу, действующую на проводники. Согласно закону Ампера, величина этой силы равна

$$F = BII, \quad (1.3)$$

а ее направление определено правилом левой руки (рис. 1.1, в). Видно, что направление силы  $F$  в правом и левом проводниках якоря совпадает с направлением скорости движения поля индуктора  $v_0$  (рис. 1.1).

Дальнейшее изложение удобнее вести для более простой модели машины, в которой якорь представлен только одним проводником (рис. 1.2).

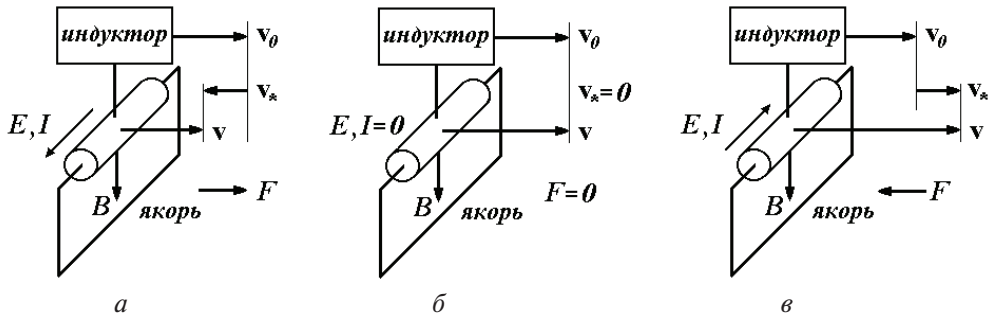


Рис. 1.2. Направления ЭДС, токов, усилий в индукционной машине:  
а) двигательный режим; б) идеальный холостой ход; в) генераторный режим

Под действием силы  $F$  проводник якоря начнет двигаться вслед за движением поля индуктора (рис. 1.2, а) с некоторой скоростью  $v$ . При этом скорость движения проводника относительно поля уменьшится и будет определяться разностью:

$$v_* = v_0 - v. \quad (1.4)$$

Соответственно, будут уменьшаться и величины ЭДС (1.1), тока якоря (1.2), силы  $F$  (1.3).

При дальнейшем увеличении скорости якоря наступит такое состояние, когда скорости якоря  $v$  и индуктора  $v_0$  сравняются и проводники якоря и поле индуктора станут взаимно неподвижны. Очевидно, в этом состоянии ЭДС движения в проводнике якоря исчезнет ( $v_* = 0$ ), что приведет к исчезновению тока якоря (1.2) и, следовательно, усилия  $F$  (1.3).

Не вдаваясь в подробности осуществления такого режима, рассмотрим следующее состояние нашего устройства, когда скорость движения проводника якоря превысит скорость движения индуктора (рис. 1.2, в). В этом случае относительная скорость  $v_*$  снова будет отлична от нуля, но изменит свое направление. Соответственно, в якоре опять появятся ЭДС, ток, что приведет к возникновению механической силы  $F$ , направленной встречно движению индуктора (движению магнитного поля индуктора).

Такое чисто качественное исследование позволяет сформулировать основную особенность рассматриваемой машины, в которой *электро-механическое преобразование энергии возможно только при несинхронном (asynchronius) движении проводников (токов) якоря и магнитного поля индуктора*.



Итак, получилась довольно странная машина, в которой для приведения в движение якоря необходимо двигать магнитное поле. Однако движение индуктора и движение поля, вообще говоря, вещи разные.

## 1.2. Образование движущегося магнитного поля в ИМ

.....

Выше было показано, что работа ИМ обеспечивается движением магнитного поля индуктора относительно проводников якоря. Покажем, что движение поля возможно при неподвижном индукторе, питаемом многофазной системой токов.

Применительно к круговым машинам такое поле обычно называют *вращающимся*, к линейным — *бегущим*.

Чаще всего для питания ИМ используется трехфазная система, реже — двухфазная.

Несмотря на одинаковое назначение обмоток индукторов круговых и линейных машин, обмотки последних имеют ряд особенностей, как в областях применения, конструкции тех или иных видов, так и в появлении особых, использующихся только в линейных машинах видов.

Образование движущегося<sup>1</sup> магнитного поля в асинхронной машине рассмотрим на примере трехфазного индуктора. Такой индуктор представляет собой магнитопровод с пазами, в которые уложены проводники различных фаз ( $A, B, C$ ), сдвинутые в пространстве на  $120^\circ$ .

Обычно в паз укладывается большое число проводников, соединяемых последовательно и образующих замкнутые контуры — вит-

---

<sup>1</sup> Во избежание возможного недопонимания сразу оговоримся, что понятие «движения» магнитного поля отлично от понятия «распространения» электромагнитного поля (распространения электромагнитной волны в вакууме со скоростью света). Понятие движения магнитного поля включает в себе представление о перемещении пространственного распределения (картины) магнитного поля. Так, двигая рукой постоянный магнит, мы можем говорить о движении магнитного поля как о перемещении в пространстве некоторого неизменного во времени (мгновенно распространяющегося в пространстве) распределения силовых линий. Тогда скорость движения пространственного распределения магнитного поля, очевидно, будет несоизмерима со скоростью распространения поля в пространстве (скоростью света в той или иной среде).

ки обмотки. Очевидно, что в противоположных сторонах витков, составляющих катушку, пространственные направления тока будут противоположными (рис. 1.3, *а*). В магнитопроводе машины такую катушку можно разместить двумя способами.

Первый способ состоит в укладке обеих сторон катушки внутри магнитопровода — в двух его пазах. В этом случае оба тока катушки принимают участие в создании магнитного поля индуктора. Пространственное расположение проводников фаз в магнитопроводе круговой машины указанными способами представлено на рис. 1.3, *б*.

Согласно второму способу, катушка охватывает магнитопровод так, что одна сторона лежит в пазу, а другая — на внешней поверхности ярма. В этом случае магнитное поле индуктора создают токи только одной стороны катушки (рис. 1.3, *в*).

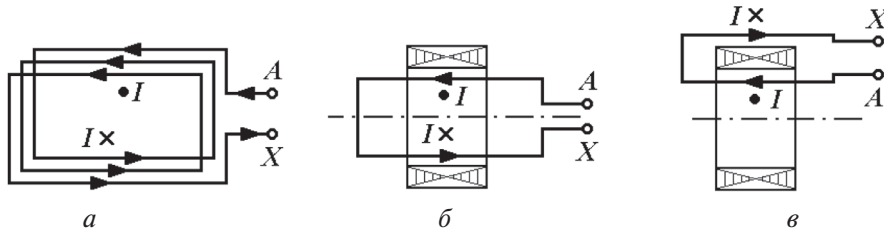


Рис. 1.3. Расположение обмоток индуктора относительно магнитопровода

Первый способ построения обмотки (рис. 1.4, *а*) фактически образует шестифазную систему токов, поскольку ток одной фазы питающей сети имеет прямое и обратное направление. Здесь проводники одной фазы шестифазной системы (или прямой и обратный проводники — трехфазной) размещаются на одной шестой окружности магнитопровода. Поэтому такие обмотки называют шестизонными или  $60^\circ$  обмотками.

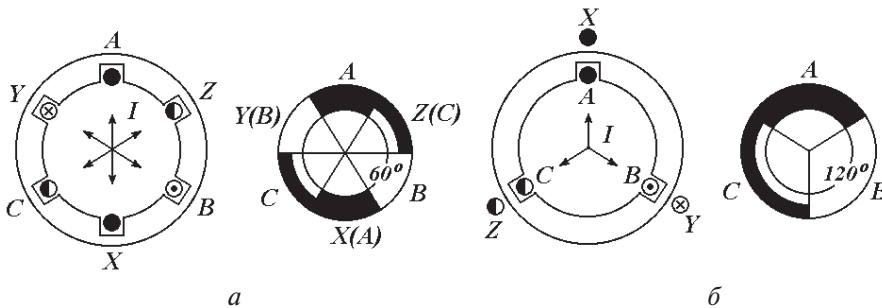


Рис. 1.4. Трехфазные обмотки круговых машин:  
а) шестизонная ( $60^\circ$ ); б) трехзонная ( $120^\circ$ )

При втором способе укладки обмотки (рис. 1.4, б) токи, создающие рабочее магнитное поле (внутри магнитопровода), представляют собой трехфазную систему. Проводники одной фазы могут занимать треть окружности магнитопровода. Поэтому такие обмотки называют трехзонными или  $120^\circ$  обмотками.

Образование вращающегося магнитного поля шестизонной обмоткой поясняется на рис. 1.5, где приведены векторные диаграммы фазных токов (рис. 1.5, а, б) и соответствующие им картины магнитного поля индуктора (рис. 1.5, в, г) для двух моментов времени. На этих рисунках мгновенные значения токов определены проекциями векторов на мнимую ось  $i = \text{Im}(\dot{I})$ . Положительным значениям токов на векторных диаграммах (рис. 1.5, а, б) соотнесены направления токов в пазах индуктора «от нас — крестик», отрицательным — «на нас — точка» (рис. 1.5, в, г). Как видно из рис. 1.5, в, г, в обоих случаях токи одного направления занимают половину окружности индуктора. Используя правило правого винта к токам в пазах, можно построить примерные картины силовых линий магнитного поля индуктора (рис. 1.5, в, г). Видно, что магнитное поле токов такой обмотки подобно вращающемуся двухполюсному кольцевому магниту.

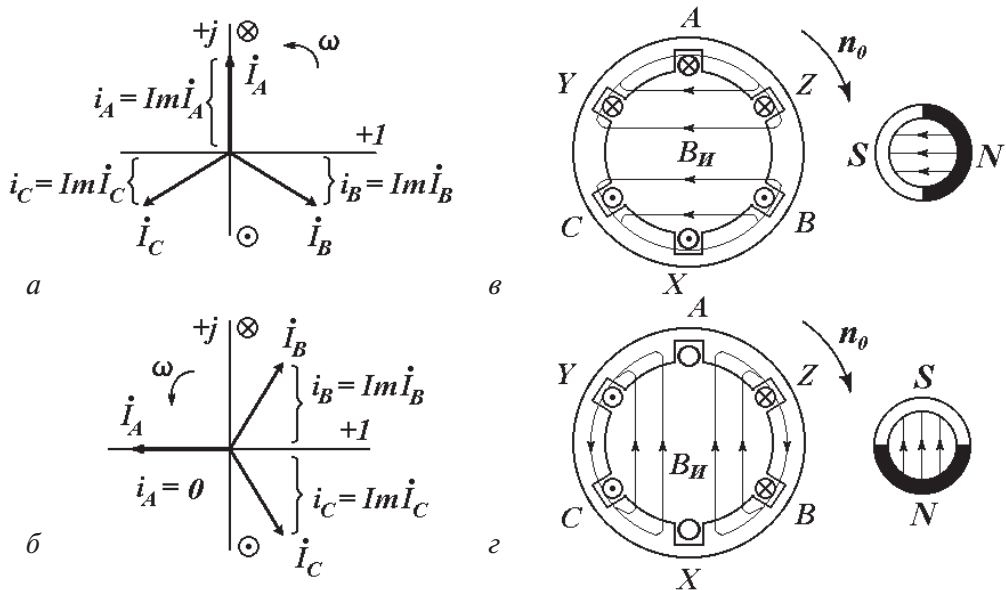


Рис. 1.5. Создание бегущего магнитного поля трехфазной шестизонной ( $60^\circ$ ) обмоткой:

а)  $\psi_{i_A} = 90^\circ$ ; б)  $\psi_{i_A} = 180^\circ$

Сопоставляя положение векторов токов на векторных диаграммах и направление магнитного поля в индукторе, можно прийти к выводу, что поворот векторов фазных токов на  $90^\circ$  (изменение величин токов во времени) приводит к повороту распределения поля также на  $90^\circ$  (в пространстве).

Таким образом, неподвижная система трех контуров, сдвинутых относительно друг друга на  $120^\circ$ , питаемых трехфазной системой напряжений, создает вращающееся магнитное поле.

Подобным образом можно показать, что трехзонная обмотка также создает движущееся магнитное поле, однако это поле подобно полю несимметричного вращающегося магнита (рис. 1.6).

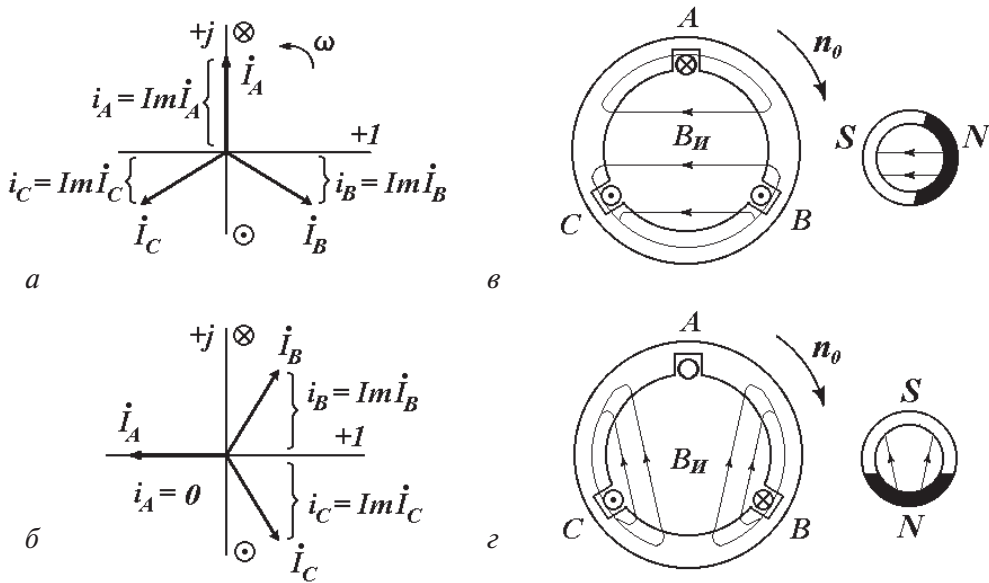


Рис. 1.6. Создание бегущего магнитного поля трехфазной трехзонной ( $120^\circ$ ) обмоткой:

а)  $\psi_{i_A} = 90^\circ$ ; б)  $\psi_{i_A} = 180^\circ$

Отметим, что помимо трех- и шестизонных обмоток, создающих движущееся магнитное поле, возможно построение и более сложных — двенадцатизонных (двенадцатифазных) обмоток [1].

### 1.3. Классификация обмоток inductionных машин

В настоящем разделе приводятся краткие сведения о построении обмоток классических ИМ [2, 3, 4], необходимые для понимания особенностей построения обмоток линейных inductionных машин (ЛИМ).

Классификация обмоток строится по следующим конструктивным признакам.

1. **Ширина фазной зоны.** Как было показано выше, трехфазные обмотки могут быть выполнены трехзонными ( $120^\circ$ ), шестизонными ( $60^\circ$ ).

2. **Пространственное расположение лобовых частей обмотки относительно магнитопровода.** В этом отношении обмотки inductionных машин разделяются на два типа:

- *барабанные обмотки*, лобовые части которых располагаются в продольной плоскости машины, из паза в паз (рис. 1.7, а);
- *кольцевые (граммовские) обмотки*, лобовые части которых располагаются в поперечной плоскости машины, охватывают ярмо магнитопровода (рис. 1.7, б).

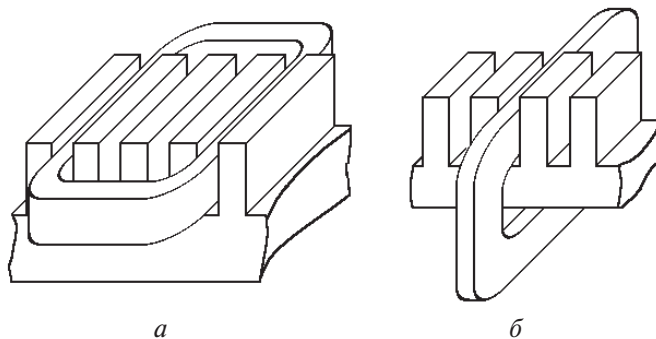


Рис. 1.7. Типы обмоток:

а) барабанная; б) кольцевая

Необходимо отметить, что в настоящее время кольцевые обмотки в круговых машинах не используются, однако находят применение в ЛИМ.

3. **Способ соединения проводников в фазе.** По этому признаку барабанные обмотки делятся на *петлевые* и *волновые*.

Фаза петлевой обмотки набирается из отдельных катушек, соединяемых между собой последовательно или параллельно (рис. 1.8, а). Фаза

волновой обмотки образуется сплошным проводником, переходящим из паза в паз, и не требует междукатушечных соединений (рис. 1.8, б).

Соответственно, петлевые обмотки технологичнее при большом числе проводников в пазу (десятки и сотни), волновые — при малом (единицы). В качестве обмоток индукторов ЛИМ волновые обмотки не применяются и поэтому далее не рассматриваются.

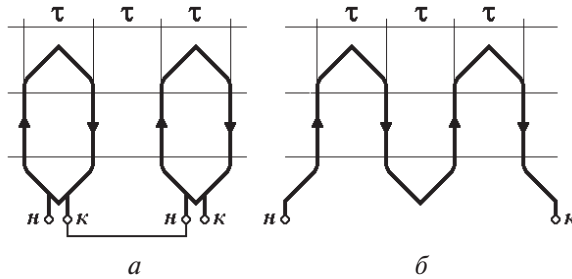


Рис. 1.8. Типы обмоток:

а) петлевая; б) волновая

**4. Форма катушек обмотки.** По этому признаку барабанные обмотки делятся на *шаблонные* и *концентрические*. Шаблонные обмотки выполняются из катушек одинаковой формы (рис. 1.9, а), концентрические — из катушек различной формы (рис. 1.9, б).

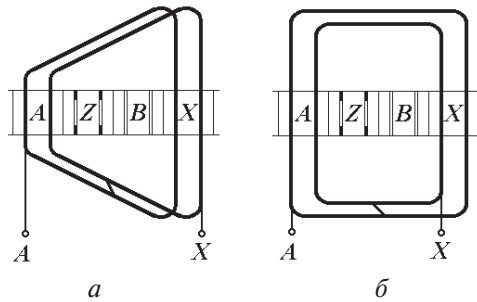


Рис. 1.9. Типы обмоток:

а) шаблонная; б) концентрическая

**5. Число сторон катушек, размещенных в одном пазу.** По этому признаку обмотки делятся на следующие типы:

- однослойные;
- двухслойные;
- двухрядные.

В однослойных обмотках сторона одной катушки полностью занимает один паз (рис. 1.10, *а*). В двухслойных и двухрядных обмотках в каждом пазу размещены стороны двух различных катушек. В двухслойных обмотках в каждом пазу стороны двух катушек размещаются одна над другой (рис. 1.10, *б*), в двухрядных — одна рядом с другой (рис. 1.10, *в*).

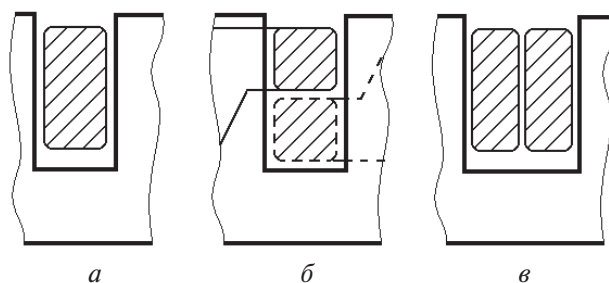


Рис. 1.10. Типы обмоток:

*а*) однослойная; *б*) двухслойная; *в*) двухрядная

Отметим, что термин «двухрядные» не является общепринятым, поскольку такой тип обмоток не применяется в круговых машинах, однако даже ограниченное использование их в ЛИМ заслуживает выделения этих обмоток в отдельный вид [5].

## 1.4. Терминология описания обмоток переменного тока

Для облегчения понимания ниже приведены основные понятия и определения [4].

**Катушка** — один или несколько последовательно соединенных витков, проводники которых лежат в одних и тех же пазах.

**Обмотка** — совокупность электрически соединенных между собой катушек.

**Активные части катушки** (обмотки) — участки (участок) катушки, лежащие в пазах и служащие для создания рабочего магнитного потока.

**Лобовые части катушки** (обмотки) — участки, лежащие вне пазов и предназначенные для соединения активных частей между собой.

**Сторона катушки** — проводники катушки, лежащие в одном пазу. В зависимости от типа обмотки (барабанной или кольцевой) в катушке может быть две или одна сторона (две или одна активные части).

**Катушечная группа** — ряд катушек одной фазы, стороны которых размещены в пазах, лежащих под одним полюсом (на одном полюсном делении). Обычно число катушек в катушечной группе обмоток индукционных машин невелико — от одной до четырех.

**Катушечная полугруппа:** в некоторых типах обмоток катушечная группа разбивается на две части, которые укладываются различным образом. Такие части одной катушечной группы называют полугруппами.

**Полюсное деление** — расстояние между серединами двух соседних полюсов обмотки индуктора.

**Зубцовое деление** — расстояние, составленное шириной паза  $b_{\Pi}$  и зуба магнитопровода  $b_Z$ :

$$t_Z = b_{\Pi} + b_Z. \quad (1.5)$$

**Шаг катушки** — расстояние между сторонами катушки. Шаг катушек принято измерять числом зубцовых делений, лежащих между сторонами, например  $y = 5$ , или номерами пазов, в которых лежат стороны катушки, например  $y = 1 - 6$  (рис. 1.1). Величина шага катушки определяет длину лобовой части и, соответственно, расход меди. В этом отношении удобна следующая классификация шага:

- *полный шаг (диаметральный)* — шаг, равный полюсному делению;
- *укороченный шаг* — шаг, длина которого меньше полюсного деления;
- *удлиненный шаг* — шаг, длина которого больше полюсного деления.

Очевидно, что укороченный шаг обеспечивает наименьший расход меди, удлиненный — наибольший. По этой причине катушки с удлиненным шагом применяются крайне редко.

**Шаг обмотки** (шаг катушечной группы) — расстояние между серединами ближайших фазных зон одной фазы. Шаг обмотки прежде всего определяет электрические и магнитные свойства обмотки: величину и форму ЭДС и намагничивающей силы (НС). Шаг обмотки принято определять как относительную величину

$$\beta = \frac{y}{\tau}, \quad (1.6)$$

измеряемую в долях полюсного деления индуктора. Необходимо отметить, что шаг обмотки может совпадать, а может и отличаться от шага



катушек, так, например, при полном шаге обмотки шаг катушек может быть укороченным.

**Фазная зона** — участок индуктора, в пазах которого размещены стороны одной катушечной группы (стороны катушек одной фазы). Величина фазной зоны обычно измеряется в градусах, при периоде ( $360^\circ$ ), равном двойному полюсному делению.

**Число пазов на полюс-фазу** — число пазов в одной фазной зоне, занимаемое сторонами катушечной группы одной фазы. Число пазов на полюс-фазу обозначается буквой  $q$ .

$$q = \frac{Z}{mp}. \quad (1.7)$$

## 2. Магнитное поле реальных ИМ и способы их описания

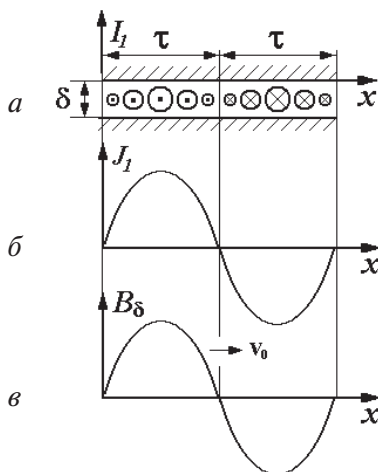
### 2.1. Постановка вопроса

**Б**азовая теория ИМ [2] строится на ряде упрощений, в том числе на предположении о чисто синусоидальной форме магнитного поля, движущегося в зазоре машины (рис. 2.1):

$$B_{\delta}(x, t) = B_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right), \quad (2.1)$$

поле может быть получено при подобной же непрерывной форме плотности тока индуктора

$$J_1(t, x) = J_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right).$$



Однако в реальных ИМ форма волны магнитного поля существенно отличается от идеальной (2.1) и представляет собой более сложные, негармонические пространственные и временные распределения.

В общем случае волну магнитного поля асинхронных машин (АМ) можно представить в виде бесконечного ряда пространственных и временных гармоник

$$B_{\delta}(x, t) = \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_{mv,k} \sin\left(k\omega t - v\frac{\pi}{\tau} x\right), \quad (2.2)$$

Рис. 2.1. Распределение магнитного поля в идеальной машине где  $v$  — номер пространственной гармоники поля;  $k$  — номер временной гармоники.

Такие искажения формы магнитного поля реальной ИМ обуславливаются как ее конструктивными особенностями (внутренними причинами), так и особенностями реальной сети, питающей ИМ (внешние причины).

Определим причины искажения формы магнитного поля в реальной АМ.

К внутренним причинам отнесем следующие особенности конструкции современных ИМ.

1. Магнитное поле создается обмотками с дискретным пространственным распределением токов, что приводит к появлению высших пространственных гармоник поля с периодом, кратным полюсному делению машины (рис. 2.2):

$$B_{\delta}(x, t) = \sum_{\nu} B_{l_{m\nu}} \sin\left(\omega t - \nu \frac{\pi}{\tau} x\right). \quad (2.3)$$

2. Величина воздушного зазора имеет переменное значение на участках «зуб — паз», что также приводит к появлению высших пространственных гармоник с периодом, кратным полюсному делению — зубцовым гармоникам (рис. 2.3):

$$B_{\delta}(x, t) = \sum_{\nu} B_{l_{m\nu}} \sin\left(\omega t - \nu_Z \frac{\pi}{\tau} x\right), \quad (2.4)$$

где (для трехфазной обмотки) [1]

$$\nu_Z = 6qk \pm 1, (k = 1, 2, 3 \dots). \quad (2.5)$$

Например, при  $q = 2$ ,  $\nu_Z = 11, 13, 23, 25 \dots$ . При  $q = 1$  все гармоники  $\nu_Z = 5, 7, 11, 13 \dots$  являются гармониками зубцового порядка.

3. Характеристика намагничивания ферромагнитных магнитопроводов ИМ нелинейна, вследствие чего даже при синусоидальной форме питающего напряжения токи обмотки индуктора будут иметь в своем составе высшие временные гармоники и, соответственно, индукции:

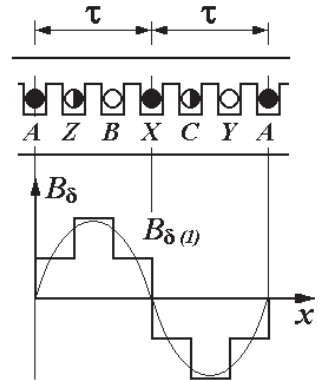


Рис. 2.2. Искажение магнитного поля распределенной обмотки

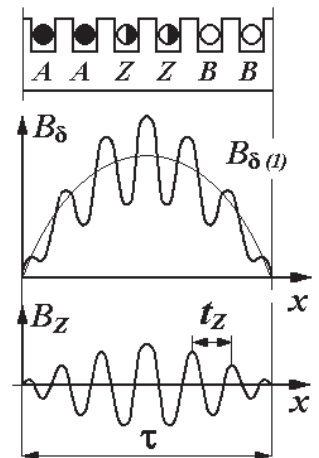


Рис. 2.3. Искажение магнитного поля зубчатой структурой магнитопровода

$$B_{\delta}(x, t) = \sum_k B_{1mk} \sin\left(k\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right). \quad (2.6)$$

4. Технологическое неравенство величин сопротивлений различных фаз обмоток индуктора в круговых ИМ или магнитная несимметрия ЛИМ обуславливает несимметрию фазных токов, что равнозначно питанию обмотки индуктора АМ тремя симметричными системами токов — прямой  $I_{1(1)}$ , обратной  $I_{1(2)}$  и нулевой  $I_{1(0)}$ :

$$\dot{I}_1(t, x) = \dot{I}_{1[1]} + \dot{I}_{1[2]} + \dot{I}_{1[0]}.$$

Это обстоятельство усложняет структуру магнитного поля: помимо прямобегающей волны, возникают обратнобегающая и пульсирующая:

$$B_{\delta}(x, t) = B_{1[1]} \sin(\omega t - \alpha x) + B_{1[2]} \sin(\omega t + \alpha x) + B_{1[0]} \sin(\omega t). \quad (2.7)$$

Внешние причины искажения формы магнитного поля ИМ обусловлены пониженным качеством электроэнергии питающей сети, прежде всего несинусоидальностью напряжения и несимметрией напряжений.

Несинусоидальность питающего напряжения обуславливает появление высших временных гармоник первичной плотности тока (и индукции), подобно (2.6).

Несимметрия напряжений питающей сети приводит к несимметрии фазных токов индуктора и, как следствие, к возникновению обратнобегающей и пульсирующей волн магнитного поля.

Очевидно, для ИМ, в которых преобразование энергии обеспечивается взаимодействием движущегося магнитного поля индуктора с токами проводников якоря, искажение формы магнитного поля (в пространственной и временной координатах) должно отрицательно сказываться на их характеристиках.

В то же время на различные типы ИМ перечисленные факторы влияют по-разному.

В классических (круговых) ИМ с малым воздушным зазором наибольшее значение имеют пространственные искажения магнитного поля, обусловленные дискретным расположением проводников обмотки и модуляцией воздушного зазора. Несимметрия фазных токов в основном связана с внешними причинами.

В ЛИМ со значительными величинами воздушного зазора влияние зубцовых гармоник мало. В то же время значительная несимме-

трия сопротивлений фаз существенно искажает структуру магнитного поля в зазоре.

## 2.2. Влияние конструкции обмоток на пространственное распределение магнитного поля в зазоре ИМ

.....

Влияние типа обмотки индуктора реальной ИМ на характер пространственного распределения магнитного поля в ее зазоре прежде всего обусловлено дискретным распределением ее плотности тока, сосредоточенной в пазах. Для анализа используем следующую идеализированную модель ИМ (рис. 2.4, а):

- магнитопроводы индуктора и якоря имеют бесконечно большую магнитную проницаемость;
- воздушный зазор по всей длине равномерен (отсутствуют пазы);
- величина воздушного зазора мала по сравнению с полюсным делением;
- стороны катушек представляют собой бесконечно тонкие нити, размещенные в зазоре;
- все катушки имеют одинаковое число витков  $w_k$  с одинаковым током  $i_k$ .

Перечисленные допущения соответствуют наличию только одной нормальной составляющей магнитного поля.

Анализ пространственных искажений магнитного поля реальных ИМ, обусловленных дискретным распределением проводников, удобно проводить, используя понятие намагничивающей силы обмотки (НС). Для упрощения анализа пока отвлечемся от временной составляющей поля, полагая в (2.1)  $\sin \omega t = 1$ .

**НС катушек одной фазы ( $q = 1$ ) с полным шагом ( $y = \tau$ ).** Определение этого понятия рассмотрим на наиболее простом примере НС катушек одной фазы идеализированной ИМ (рис. 2.4, а).

Используя закон полного тока для модели ИМ по рис. 2.4, а

$$\oint H dl = w_k i_k$$

к произвольному контуру, охватывающему воздушный зазор, магнитопроводы машины и сторону катушки, получим следующее уравнение:

$$2H_{\delta}\delta + 2H_{CT}\Delta x = w_K i_K. \quad (2.8)$$

Допущение о бесконечно большой магнитной проницаемости магнитопроводов ( $\mu_{CT} = \infty$ ) соответствует бесконечно малой величине напряженности магнитного поля в них ( $H_{CT} = 0$ ), что позволяет представить уравнение (2.8) в более простом виде:

$$2H_{\delta}\delta = w_K i_K. \quad (2.9)$$

Полученное выражение позволяет найти величину индукции в зазоре

$$B_{\delta} = \mu_0 H_{\delta} = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot \frac{w_K i_K}{2}. \quad (2.10)$$

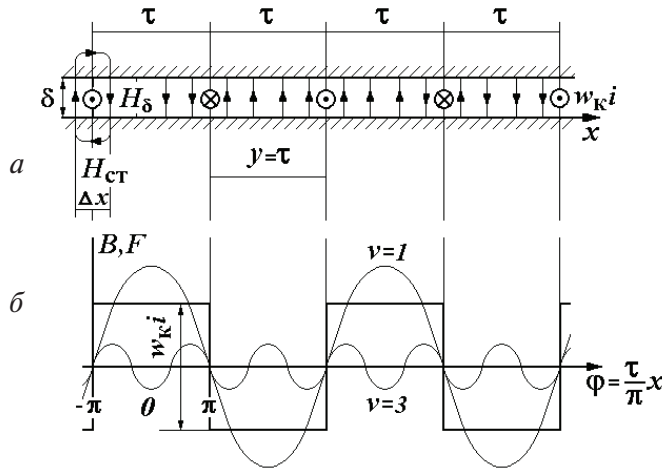


Рис. 2.4. Конструктивное исполнение и НС сосредоточенной обмотки с полным шагом

В выражении (2.10) первый сомножитель

$$\Lambda_{\delta} = \frac{\mu_0}{\delta} \quad (2.11)$$

представляет собой удельную магнитную проводимость воздушного зазора, а второй — намагничивающую силу катушки (НС):

$$F_K = \frac{w_K i_K}{2}. \quad (2.12)$$

Как следует из рис. 2.4, б, пространственное распределение НС (в относительных координатах  $\varphi = \tau x/\pi$ ) имеет вид симметричной зна-

копеременной ступенчатой функции. Разложение ее в ряд Фурье дает бесконечную сумму нечетных гармоник:

$$F_K(x) = F_m \frac{4}{\pi} \left[ \cos \frac{\tau}{\pi} x + \frac{1}{3} \cos 3 \frac{\tau}{\pi} x + \frac{1}{5} \cos 5 \frac{\tau}{\pi} x + \dots \right], \quad (2.13)$$

где  $F_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} w_K I_K \approx 0,9 w_K I_K$  — амплитуда НС,  $I_K$  — действующее значение тока катушки.

**НС катушечной группы одной фазы ( $q > 1$ ) с полным шагом ( $y = \tau$ ).** На рис. 2.5, а показана катушечная группа из  $q = 3$  катушек, имеющих полный шаг, размещенная в фазной зоне шириной  $\tau/m$  (в относительных координатах  $\vartheta = \pi/m$ ). В пределах фазной зоны эти катушки сдвинуты относительно друг друга на величину  $\tau/mq$ .

Как видно из рис. 2.5, б, первые гармоники НС отдельных катушек также сдвинуты относительно друг друга на угол  $\gamma = \pi/mq$ . Соответственно, результирующая НС катушечной группы  $F$  будет равна геометрической сумме НС отдельных катушек  $F_K$  (меньшей их алгебраической суммы  $qF_K$ ).

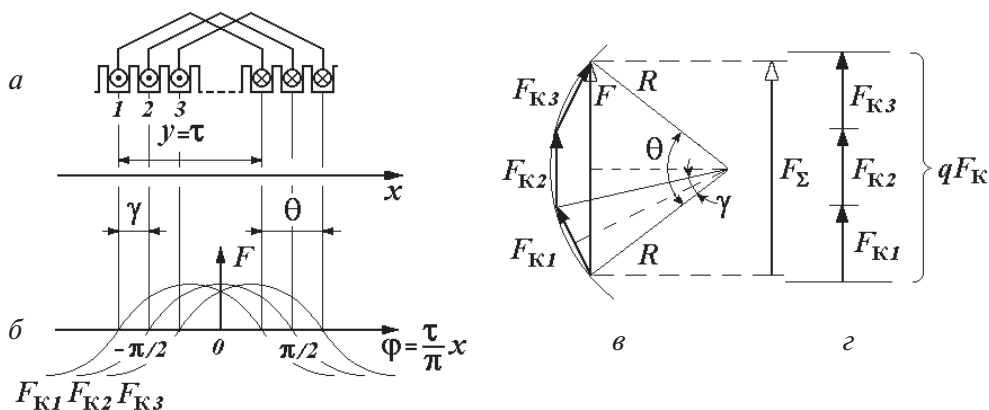


Рис. 2.5. Конструктивное исполнение и НС катушечной группы обмотки с полным шагом

Для определения влияния распределения катушечной группы на результирующую НС введем понятие коэффициента распределения, представляющего собой отношение геометрической суммы НС к алгебраической:

$$k_p = \frac{F}{qF_K}. \quad (2.14)$$

Для нахождения величины  $k_p$  впишем ломаную кривую, образованную векторами  $F_K$ , в окружность с радиусом  $R$  (рис. 2.5, в). Тогда величины  $F$  и  $F_K$  будут связаны с радиусом  $R$  следующими соотношениями:

$$F_\Sigma = 2R \sin \frac{\vartheta}{2}, \quad F_K = 2R \sin \frac{\gamma}{2} = 2R \sin \frac{\vartheta}{2q},$$

что дает выражение коэффициента распределения для первой гармоники НС (2.14):

$$k_{p1} = \frac{\sin \frac{\vartheta}{2}}{q \sin \frac{\vartheta}{2q}}.$$

Для высших гармоник с порядковым номером  $\nu = 1, 2, 3, \dots$  сдвиг между амплитудами НС отдельных катушек равен  $\gamma_\nu = \nu\gamma$ . Соответственно, общее выражение для коэффициента распределения для всех гармоник примет следующий вид:

$$k_{p\nu} = \frac{\sin \frac{\nu\vartheta}{2}}{q \sin \frac{\nu\vartheta}{2q}}. \quad (2.15)$$

Отметим, что распределение обмотки служит эффективным средством для подавления высших пространственных гармоник, о чем свидетельствует табл. 2.1 [2].

Таблица 2.1

Значения  $k_{p\nu}$  шестизонных трехфазных обмоток ( $\vartheta = 2\pi/6$ )

$\nu/q$	1	2	3	4	$\infty$
1	1,00	0,966	0,960	0,958	0,955
3	1,00	0,707	0,667	0,654	0,636
5	1,00	0,259	0,217	0,205	0,191
7	1,00	-0,259	-0,177	-0,158	-0,136
9	1,00	-0,707	-0,333	-0,270	-0,212

**НС катушечной группы одной фазы ( $q > 1$ ) двухслойной обмотки с укороченным шагом ( $y = \beta\tau$ ). Распределение токов в пазах катушечной группы двухслойной обмотки с укороченным шагом  $y = \beta\tau$  (рис. 2.6, а)**



можно представить как сумму токов двух однослойных обмоток с полным шагом  $y = \tau$  (рис. 2.6, б), сдвинутых относительно друг друга на величину укорочения шага:

$$\tau - y = \tau - \beta\tau = (1 - \beta)\tau.$$

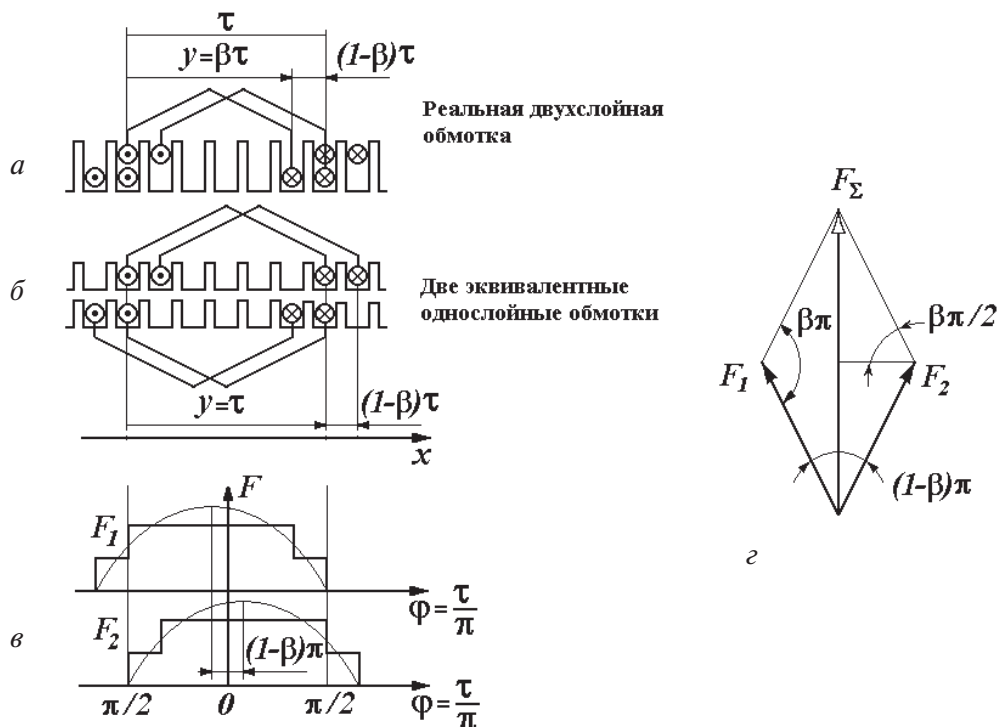


Рис. 2.6. Конструктивное исполнение и НС катушечной группы двухслойной обмотки с укороченным шагом

На рис 2.6, в показаны пространственные распределения НС однослойных обмоток и графики их первых гармоник. Видно, что угол сдвига этих гармоник  $\Delta\varphi = (1 - \beta)\pi$ . Векторная диаграмма сложения первых гармоник НС однослойных обмоток  $F_1 + F_2 = F$  приведена на рис. 2.6, г, которой соответствует следующее уравнение:

$$F = (F_1 + F_2) \sin \frac{\pi\beta}{2}. \quad (2.16)$$

Уравнение (2.16) позволяет определить степень снижения величины первой гармоники результирующей НС такой обмотки введением коэффициента укорочения

$$k_{y1} = \frac{F}{F_1 + F_2} = \sin \frac{\pi\beta}{2}. \quad (2.17)$$

Распространяя выражение (2.17) на весь спектр пространственных гармоник, получим

$$k_{yv} = \sin v \frac{\pi\beta}{2}. \quad (2.18)$$

Отметим, что соответствующим подбором шага обмотки можно добиться уничтожения произвольной пространственной гармоники НС. Например, при  $\beta = 4/5$  коэффициент укорочения (2.18) для пятой гармоники равен нулю:

$$k_{y5} = \sin 5 \frac{\pi 4}{2 \cdot 5} = \sin 2\pi = 0.$$

**Обмоточный коэффициент.** Снижение НС реальной обмотки по сравнению с идеальной удобно оценивать с помощью обмоточного коэффициента

$$k_{обв} = \frac{F_v}{qF_{Kv}} = k_{pi} k_{yv}. \quad (2.19)$$

### 2.3. Представление пульсирующего поля в виде двух вращающихся полей

.....

Полученное выше пространственное распределение НС  $F_K(x)$  катушки (катушечной группы) позволяет теперь получить выражение для НС фазы реальной обмотки переменного синусоидального тока в виде бесконечного ряда пространственно-временных гармоник:

$$F_K(x, t) = \sum_v F_{mv} \cos v \frac{\tau}{\pi} x \sin \omega t. \quad (2.20)$$

В (2.20) каждая гармоника НС имеет следующее аналитическое выражение

$$F_{Kv}(x, t) = F_{mv} \cos v \frac{\tau}{\pi} x \sin \omega t = F_{Kmv}(x) \sin \omega t, \quad (2.21)$$

которое представляет собой неподвижную пространственную гармонику  $F_{mv}(x) = \cos(v\tau/\pi x)$ , амплитуда которой изменяется во времени по гармоническому закону  $F_{mv}(t) = \sin(\omega t)$  (рис. 2.7).

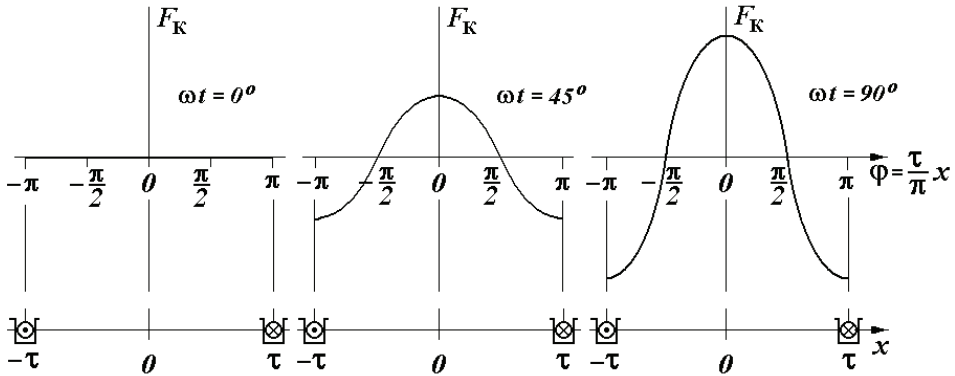


Рис. 2.7. Изменение НС катушки во времени

Применяя к пространственно-временному выражению НС (2.21) тригонометрическую формулу

$$\sin a \cos b = \frac{1}{2} [\sin(a-b) + \sin(a+b)],$$

представим пульсирующую НС катушечной группы обмотки переменного тока (2.14) в следующем виде:

$$F_{Kv}(t, x) = \frac{1}{2} F_{mv} \left[ \sin \left( \omega t - v \frac{\pi}{\tau} x \right) \right] + \frac{1}{2} F_{mv} \left[ \sin \left( \omega t + v \frac{\pi}{\tau} x \right) \right]. \quad (2.22)$$

Каждый из правых членов этого равенства представляет собой движущуюся волну НС, которая распределена в пространстве вдоль координаты  $x$  по синусоидальному закону.

Наглядное представление такого разложения дает рис. 2.8, где приведены векторные диаграммы и мгновенные значения НС для нескольких моментов времени.

**Скорости движения волн НС.** Скорость движения гармонической волны (фазовая скорость) определяется скоростью перемещения некоторой выбранной точки на ее пространственном распределении. Для такой точки значения гармонической функции в (2.22)

$$\sin \left( \omega t \pm v \frac{\pi}{\tau} x \right) = \text{const},$$

а следовательно, и ее аргумента будут неизменными в любой момент времени

$$\omega t \mp v \frac{\pi}{\tau} x = \text{const}. \quad (2.23)$$

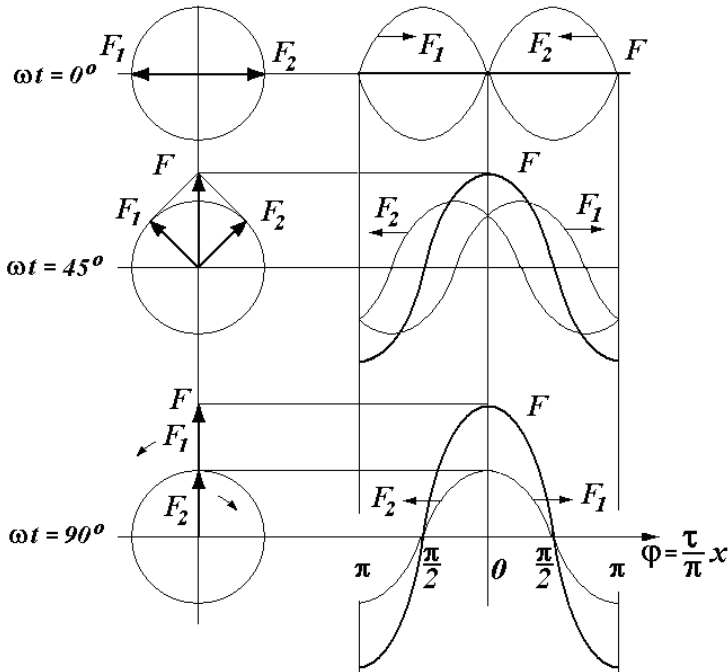


Рис. 2.8. Представление пульсирующей НС в виде двух встречно вращающихся

Дифференцирование аргумента по времени при условии (2.23)

$$\frac{d}{dt} \left( \omega t \mp v \frac{\pi}{\tau} x \right) = 0, \quad \omega \mp v \frac{\pi}{\tau} \frac{dx}{dt} = 0, \quad \omega \mp v \frac{\pi}{\tau} v = 0$$

позволяет получить выражения для фазовых скоростей прямой и обратнобегущих волн  $v$ :

$$v_{v \rightarrow} = \frac{\omega}{v} \frac{\tau}{\pi} = \frac{2\tau f}{v}, \quad v_{v \leftarrow} = -\frac{\omega}{v} \frac{\tau}{\pi} = -\frac{2\tau f}{v}. \quad (2.24)$$

## 2.4. НС трехфазной шестизонной обмотки

Пространственную структуру НС трехфазной обмотки индуктора ИМ рассмотрим на примере наиболее распространенной шестизонной обмотки, в структуре которой присутствуют только нечетные гармоники.

Ее НС определим как сумму НС отдельных фаз. Такое сложение удобно проводить при представлении НС каждой фазы в виде двух встречно бегущих волн (2.22). Как будет видно ниже, величина и характер результирующей НС существенно зависят от номера пространственной гармоники.

**Первая гармоника НС. НС первых гармоник отдельных фаз сдвинуты относительно друг друга на  $120^\circ$ , т. е.:**

$$\begin{aligned} F_{A(1)} &= F_m \sin \omega t \cos \frac{\pi}{\tau} x, \\ F_{B(1)} &= F_m \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left( \frac{\pi}{\tau} x - \frac{2\pi}{3} \right), \\ F_{C(1)} &= F_m \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cos \left( \frac{\pi}{\tau} x - \frac{4\pi}{3} \right). \end{aligned} \quad (2.25)$$

Разложим (2.25) на встречно бегущие волны согласно (2.22):

$$\begin{aligned} F_{A(1)} &= \frac{F_{m(1)}}{2} \left[ \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) + \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{\tau} x \right) \right] = \\ &= F_{A(1) \rightarrow} + F_{A(1) \leftarrow} \\ F_{B(1)} &= \frac{F_{m(1)}}{2} \left[ \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) + \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{4\pi}{3} \right) \right] = \\ &= F_{B(1) \rightarrow} + F_{B(1) \leftarrow} \\ F_{C(1)} &= \frac{F_{m(1)}}{2} \left[ \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) + \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{8\pi}{3} \right) \right] = \\ &= F_{C(1) \rightarrow} + F_{C(1) \leftarrow} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Сложение прямо и обратно бегущих волн фаз НС первых гармоник по (2.26) дает следующий результат:

$$\begin{aligned} F_{(1)} &= F_{A(1)} + F_{B(1)} + F_{C(1)} = \\ &= \underbrace{F_{A(1) \rightarrow} + F_{B(1) \rightarrow} + F_{C(1) \rightarrow}}_{3F_{\rightarrow}} + \underbrace{F_{A(1) \leftarrow} + F_{B(1) \leftarrow} + F_{C(1) \leftarrow}}_0 = \\ &= \frac{3}{2} F_{m(1)} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right). \end{aligned} \quad (2.27)$$

Таким образом, прямо бегущие волны первых пространственных гармоник фаз трехфазной обмотки складываются, а обратно бегущие — взаимно уничтожаются.

**Третья гармоника НС.** НС третьих гармоник отдельных фаз сдвинуты относительно друг друга на  $3 \cdot 120^\circ = 360^\circ$ , т. е. эти гармоники образуют систему нулевой последовательности

$$\begin{aligned} F_{A(3)} &= F_{m(3)} \sin \omega t \cos 3 \frac{\pi}{\tau} x, \\ F_{B(3)} &= F_{m(3)} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left( \frac{3\pi}{\tau} x - 3 \cdot \frac{2\pi}{3} \right), \\ F_{C(3)} &= F_{m(3)} \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cos \left( \frac{3\pi}{\tau} x - 3 \cdot \frac{4\pi}{3} \right). \end{aligned} \quad (2.28)$$

Разложим пульсирующие НС фаз на сумму прямо и встречно бегущих волн:

$$\begin{aligned} F_{A(3)} &= \frac{F_{m(3)}}{2} \left[ \sin \left( \omega t - 3 \frac{\pi}{\tau} x \right) + \sin \left( \omega t + 3 \frac{\pi}{\tau} x \right) \right] = \\ &= F_{A(3) \rightarrow} + F_{A(3) \leftarrow} = 0, \\ F_{B(3)} &= \frac{F_{m(3)}}{2} \left[ \sin \left( \omega t - \frac{3\pi}{\tau} x + \frac{4\pi}{3} \right) + \sin \left( \omega t + \frac{3\pi}{\tau} x - \frac{8\pi}{3} \right) \right] = \\ &= F_{B(3) \rightarrow} + F_{B(3) \leftarrow} = 0, \\ F_{C(3)} &= \frac{F_{m(3)}}{2} \left[ \sin \left( \omega t - \frac{3\pi}{\tau} x + \frac{8\pi}{3} \right) + \sin \left( \omega t + \frac{3\pi}{\tau} x - \frac{16\pi}{3} \right) \right] = \\ &= F_{C(3) \rightarrow} + F_{C(3) \leftarrow} = 0, \end{aligned}$$

что дает следующий результат:

$$\begin{aligned} F_{(3)} &= \underbrace{F_{A(3) \rightarrow} + F_{B(3) \rightarrow} + F_{C(3) \rightarrow}}_0 + \\ &+ \underbrace{F_{A(3) \leftarrow} + F_{B(3) \leftarrow} + F_{C(3) \leftarrow}}_0 = 0. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Таким образом, в шестизонных обмотках ИМ прямо и встречно бегущие третьи гармоники взаимно уничтожают друг друга, и, следовательно, в спектре высших гармоник третьи отсутствуют.

*Пятая гармоника НС. НС пятых гармоник отдельных фаз сдвинуты относительно друг друга на  $5 \cdot 120^\circ$ , т. е.:*

$$\begin{aligned}
 F_{A(5)} &= F_{m(5)} \sin \omega t \cos 5 \frac{\pi}{\tau} x, \\
 F_{B(5)} &= F_{m(5)} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left( 5 \frac{\pi}{\tau} x - 5 \cdot \frac{2\pi}{3} \right), \\
 F_{C(5)} &= F_{m(5)} \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cos \left( 5 \frac{\pi}{\tau} x - 5 \cdot \frac{4\pi}{3} \right)
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

ИЛИ

$$\begin{aligned}
 F_{A(5)} &= \frac{F_{m(5)}}{2} \left[ \sin \left( \omega t - 5 \frac{\pi}{\tau} x \right) + \sin \left( \omega t + 5 \frac{\pi}{\tau} x \right) \right] = \\
 &= F_{A(5) \rightarrow} + F_{A(5) \leftarrow} \\
 F_{B(5)} &= \frac{F_{m(5)}}{2} \left[ \sin \left( \omega t - 5 \frac{\pi}{\tau} x + \frac{8\pi}{3} \right) + \sin \left( \omega t + 5 \frac{\pi}{\tau} x - \frac{12\pi}{3} \right) \right] = \\
 &= F_{B(5) \rightarrow} + F_{B(5) \leftarrow} \\
 F_{C(5)} &= \frac{F_{m(5)}}{2} \left[ \sin \left( \omega t - 5 \frac{\pi}{\tau} x + \frac{24\pi}{3} \right) + \sin \left( \omega t + 5 \frac{\pi}{\tau} x - \frac{16\pi}{3} \right) \right] = \\
 &= F_{C(5) \rightarrow} + F_{C(5) \leftarrow}
 \end{aligned}$$

Результирующая величина пятой пространственной гармоники НС

$$\begin{aligned}
 F_{(5)} &= F_{A(5)} + F_{B(5)} + F_{C(5)} = \\
 &= \underbrace{F_{A(5) \rightarrow} + F_{B(5) \rightarrow} + F_{C(5) \rightarrow}}_0 + \underbrace{F_{A(5) \leftarrow} + F_{B(5) \leftarrow} + F_{C(5) \leftarrow}}_{3F_{\leftarrow}} = \\
 &= \frac{3}{2} F_{m(5)} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right).
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

Таким образом, прямо бегущие волны пятых пространственных гармоник фаз трехфазной обмотки взаимно уничтожаются, а обратно бегущие складываются, т. е. пятые гармоники создают обратно бегущее магнитное поле.

Приведенные выше частные примеры с пространственными гармониками  $\nu = 1, 3, 5$  для шестизонной обмотки показывают, что:

— первая гармоника НС создает прямо бегущее магнитное поле;

— третья гармоника НС не приводит к возникновению каких-либо полей;

— пятая гармоника НС создает обратно бегущее магнитное поле.

Дальнейший анализ структуры НС шестизонной обмотки индуктора ИМ для высших гармоник с  $\nu > 5$  дает следующее общее правило, согласно которому высшие пространственные гармоники НС порядка  $\nu$  создают магнитные поля прямо  $\nu \rightarrow$  и обратно  $\nu \leftarrow$  бегущие волны магнитного поля:

$$\nu = 6n \pm 1 \begin{cases} \nu = 6n + 1 & (\nu = 1, 7, 13, \dots) & \nu \rightarrow \\ \nu = 6n - 1 & (\nu = 5, 11, 17, \dots) & \nu \leftarrow \end{cases} \quad (2.32)$$

## 2.5. Особенности пространственного искажения магнитного поля ЛИМ

Конечная длина индуктора ЛИМ приводит к появлению дополнительных магнитных потоков, замыкающихся вне ее магнитопровода (активной зоны) — в краевых зонах (рис. 2.9), что в свою очередь нарушает строго периодическую структуру поля в зазоре. Помимо бегущего магнитного поля возникают составляющие иного характера — бегущие аperiodические, пульсирующие. Это явление в отечественной технической литературе получило название «первичного продольного краевого эффекта» [5, 6].

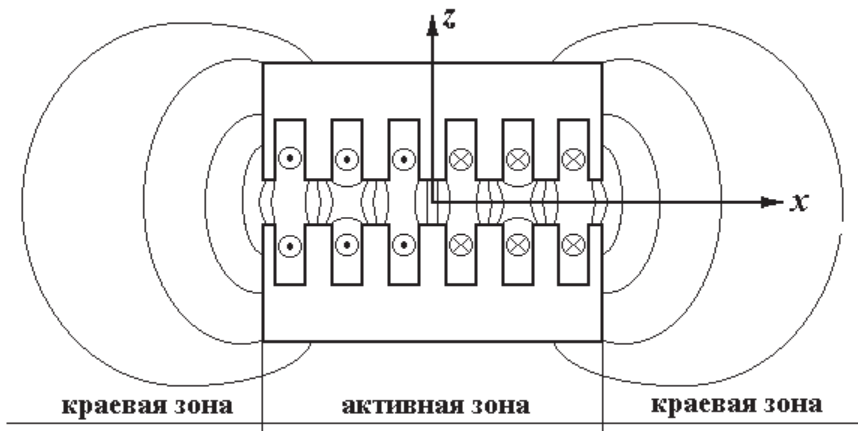


Рис. 2.9. Структура магнитного поля в ЛИМ



При этом особенностью ЛИМ по сравнению с круговыми ИМ является возможность получения индукторов с нечетным числом полюсов и неравномерным по длине распределением токовой нагрузки  $J(x)$ . Соответственно, в ЛИМ появляется дополнительный фактор, влияющий на характер пространственного распределения поля в зазоре — число полюсов и тип обмотки: однослойные, двухслойные и обмотки со сторонами катушек, лежащих за пределами магнитопровода.

В самом простом случае ЛИМ без якоря магнитное поле в зазоре имеет бегущую  $B_{\delta}$  и пульсирующую  $B_{\Pi}$  составляющие [4]

$$B_{\delta} = B_{\delta} \sin(\omega t - \alpha x) - (-1)^p B_{\Pi} \sin \omega t, \quad (2.33)$$

где  $p$  — число пар полюсов.

Представление о характере магнитного поля пустого индуктора ЛИМ дает рис. 2.10, где приведены распределения мгновенных значений относительных величин индукции  $B_{\delta}$  по длине машины. В пределах активной зоны (в зазоре индуктора) отчетливо прослеживается движение знакопеременного поля, подобно круговым машинам, с той разницей, что его амплитуда существенно изменяется вдоль длины машины, образуя провалы на краях периода ( $2\tau$ ) и всплески в середине.

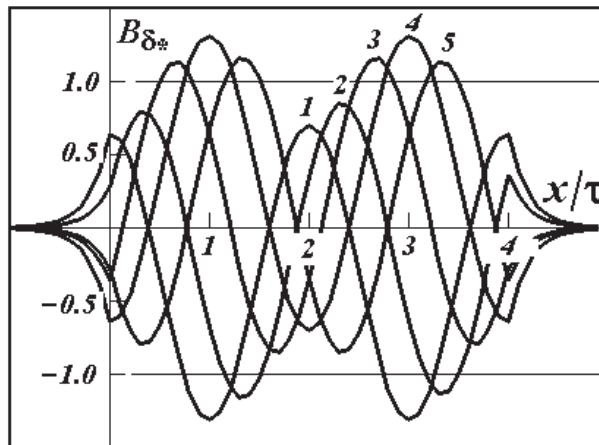


Рис. 2.10. Пространственное распределение магнитного поля в зазоре ЛИМ в различные моменты времени:

1 —  $\omega t = 0^\circ$ ; 2 —  $\omega t = 60^\circ$ ; 3 —  $\omega t = 120^\circ$ ; 4 —  $\omega t = 180^\circ$ ; 5 —  $\omega t = 240^\circ$

Такая модуляция амплитуды индукции  $B_m(x)$  в зазоре индуктора ЛИМ составляет характерный признак проявления первичного краевого эффекта [5] — наличия разрыва магнитной цепи индуктора. Очевидно, величина модуляции  $B_m(x)$  может служить и мерой степени проявления первичного краевого эффекта (величины пульсирующей составляющей поля). По этой причине в теории ЛИМ возникло очень наглядное представление — *огibaющей* индукции — зависимости амплитуды индукции в зазоре от продольной координаты  $B_\delta$  (рис. 2.11).

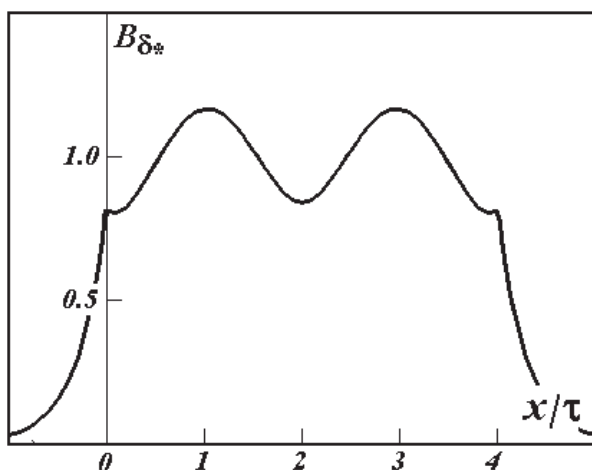


Рис. 2.11. Огибающая магнитного поля в зазоре ЛИМ

Так, на рис. 2.12 представлены огибающие магнитного поля в пустом зазоре индукторов ЛИМ с различным числом полюсов при одно- и двухслойных обмотках.

Как показано в [5], пульсирующая составляющая магнитного поля ЛИМ может быть подавлена полем двух токов в проводниках, размещенных на торцах магнитопровода. При этом НС этих проводников должна быть равна НС средней фазы индуктора ЛИМ (рис. 2.13). Обмотки, образующие свободные стороны катушек с НС средней фазы, называются *корректирующими* [5].

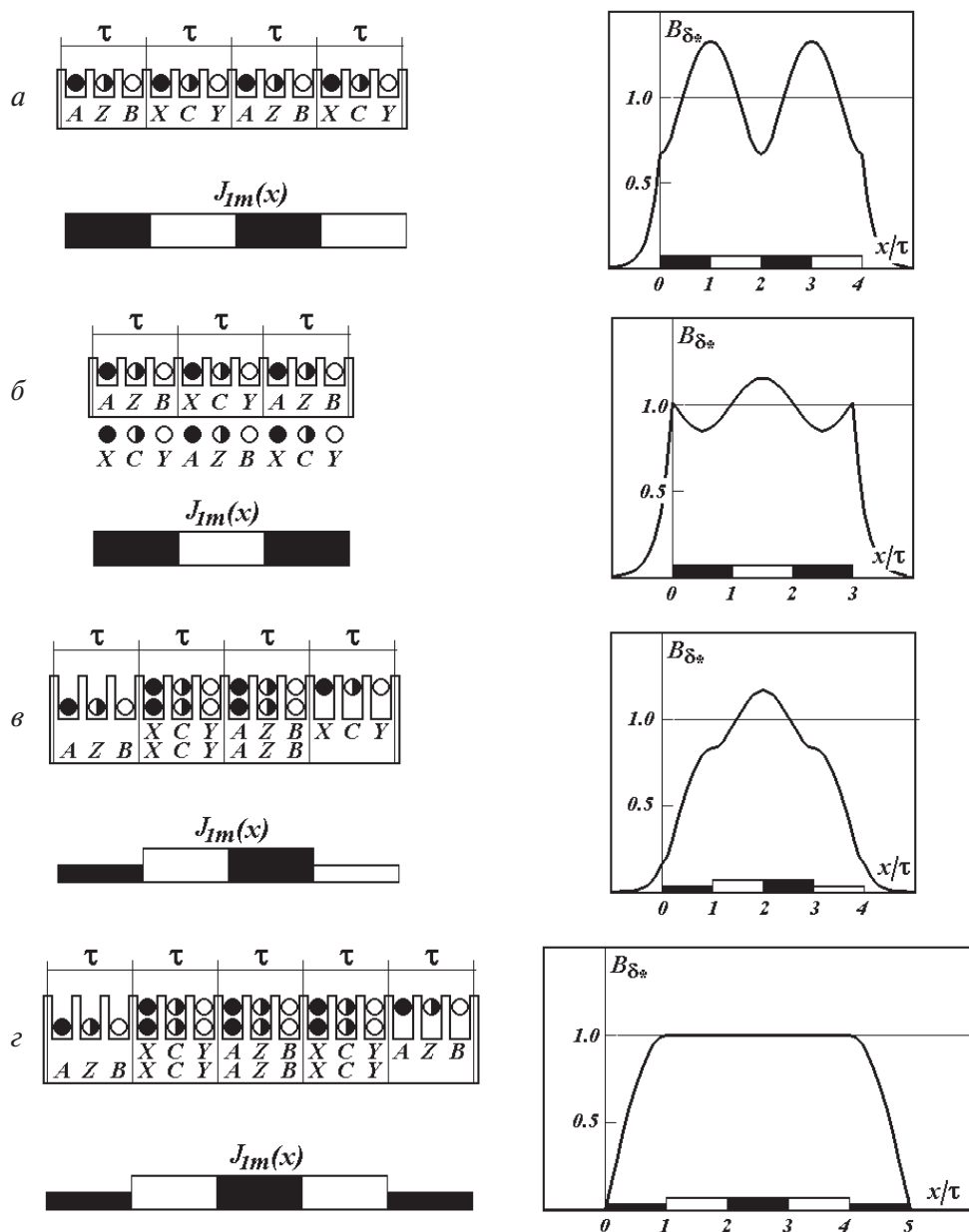


Рис. 2.12. Схемы, эпюры плотности тока, огибающие индукции ЛИМ:  
 а) с однослойной обмоткой с четным числом полюсов; б) с однослойной обмоткой с нечетным числом полюсов; в) с двухслойной обмоткой с четным числом полюсов; г) с двухслойной обмоткой с нечетным числом полюсов

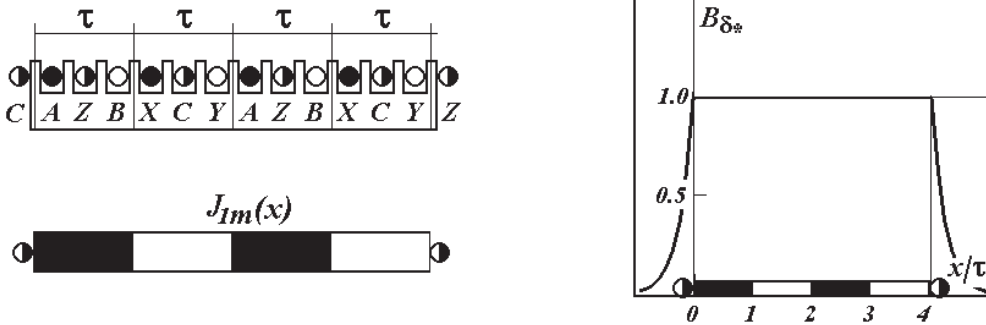


Рис. 2.13. Схемы, эпюры плотности тока, огибающие индукции ЛИМ с компенсирующей обмоткой

## 2.6. Временные искажения магнитного поля реальной ИМ

В основном временные искажения магнитного поля в реальной ИМ возникают в результате внешних факторов, при применении полупроводниковых преобразователей частоты.

Рассмотрим наиболее предельный случай прямоугольной формы питающего напряжения (рис. 2.6). Разложение такой функции в ряд Фурье дает только нечетные гармоники:

$$u(t) = U \frac{4}{\pi} \left[ \cos \omega t + \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \dots \right], \quad (2.34)$$

Соответствующие гармоники тока индуктора создают магнитные поля, вращающиеся с частотой

$$n_k = \frac{60 f_k}{p} = \frac{60 k f_1}{p} = n_1 k, \quad (2.35)$$

где  $f_k$  — частота  $k$ -й гармоники.

Очевидно, магнитные поля высших гармоник тока движутся быстрее первой гармоники.

Как и в случае пространственных гармоник, временные образуют прямо и обратно бегущие поля, по правилу (2.32).

---

## 3. Конструкции и свойства обмоток ИМ и ЛИМ

---

### 3.1. Барабанные однослойные шаблонные обмотки

---

Основным отличительным признаком однослойных шаблонных обмоток является одинаковая длина (и исходная форма) всех катушек (рис. 3.1). Барабанные однослойные шаблонные (как и концентрические) обмотки могут быть выполнены только шестизонными.

**Технологические свойства однослойных шаблонных обмоток.** Шаблонные обмотки выполняются из отдельных катушек изначально плоской формы, которые укладываются в пазы магнитопровода, с последующим изгибом (формовкой) лобовых частей. Такая технология требует большой гибкости обмоточного провода, что позволяет выполнять катушки шаблонных обмоток только мягкими, из провода круглого сечения, диаметром не более 2,5 мм.

Несомненным технологическим достоинством шаблонных обмоток является простота изготовления катушек, поскольку для их намотки требуется изготовление только одного плоского шаблона. Это свойство шаблонных обмоток становится особо ценным в мелкосерийном и единичном производстве, что часто имеет место при изготовлении ЛИМ.

Однако простота изготовления катушек оборачивается усложнением их укладки в магнитопровод, сопровождающейся дополнительной технологической операцией формовки лобовых частей катушек (выполняемой вручную). Для облегчения формовки лобовых частей

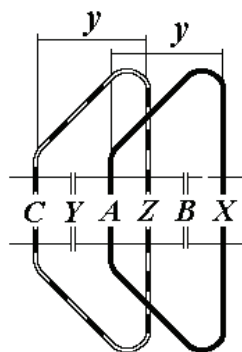


Рис. 3.1 Шаблонная обмотка

(размещения их в разных плоскостях) катушки шаблонной обмотки круговых машин делают трапецеидальной формы, когда одна сторона катушки выполняется короткой, а другая — длинной (левая — короткая, правая — длинная, или наоборот).

**Надежность.** Неизбежное соприкосновение лобовых частей катушек различных фаз в шаблонных обмотках требует применения дополнительной междофазной изоляции, например прокладки листовых изоляционных материалов между ними. Как следствие, такое пересечение лобовых частей снижает надежность шаблонных обмоток.

**Электрические свойства.** Шаблонные обмотки обладают ценным свойством: наряду с последовательным соединением катушек и катушечных групп в фазе, возможностью их параллельного соединения при равномерном распределении токов по параллельным ветвям, что обусловлено одинаковыми сопротивлениями (длиной) всех катушек. Схемы последовательного и параллельного соединений катушек (катушечных групп) одной фазы шаблонной обмотки показаны на рис. 3.2. На этих схемах начала катушек обозначены буквами «Н», концы — «К».

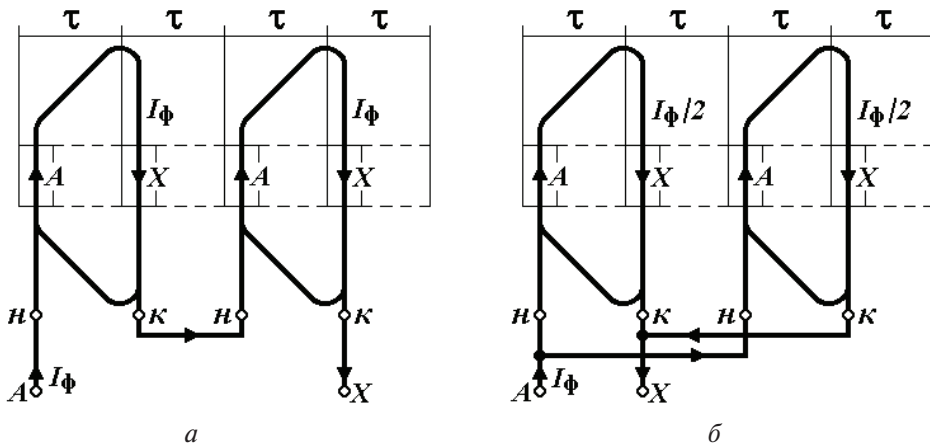


Рис. 3.2. Соединения катушечных групп шаблонной обмотки:

а) последовательное; б) параллельное

**Виды шаблонных обмоток.** Классификация однослойных шаблонных обмоток приведена на рис. 3.3.

Образование трехфазных однослойных обмоток из катушек одинаковой формы возможно двумя способами укладки катушечных групп различных фаз — с чередованием короткой и длинной сторон

(рис. 3.4, *а*) или без чередования (рис. 3.4, *б*). Как видно из рис. 3.4, *а*, первый способ дает пересечение лобовых частей только двух соседних фаз, а второй (рис. 3.4, *б*) — всех трех фаз.

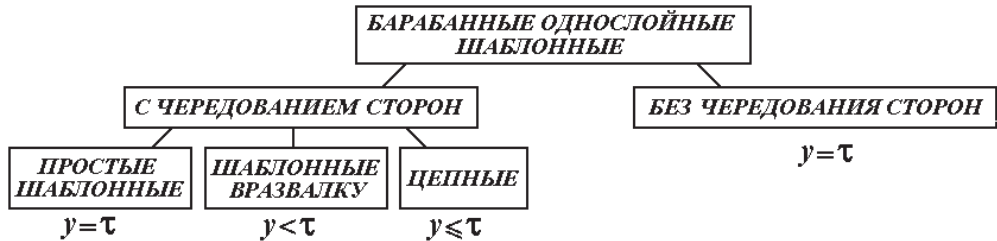


Рис. 3.3. Классификация однослойных шаблонных обмоток

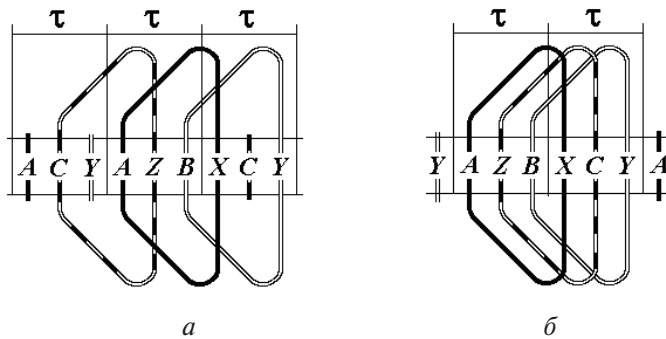


Рис. 3.4. Способы укладки сторон катушечных групп шаблонной обмотки:  
*а*) с чередованием правой и левой сторон; *б*) без чередования

Значительное упрощение формовки лобовых частей (и сокращение их длины) обмоток с чередованием сторон обусловило исключительное применение этого способа укладки катушек в шаблонных обмотках круговых машин.

В свою очередь, шаблонные обмотки круговых машин (с чередованием сторон катушек разных фаз) различаются способом укладки катушечных групп по фазным зонам и по этому признаку разделяются на три типа.

1. *Простые шаблонные обмотки* (рис. 3.5, *а*), в которых катушки одной катушечной группы размещают в двух фазных зонах, например *А* и *Х*. Соответственно, в каждой фазной зоне этих обмоток лежат стороны катушек одной длины — или короткие, или длинные. Катушки такой обмотки могут быть выполнены только с полным шагом.

2. *Шаблонные обмотки «вразвалку»* (рис. 3.5, б). Здесь катушечная группа разбивается на две подгруппы, катушки которых укладывают в противоположных направлениях («разваливают» в разные стороны), они занимают три фазные зоны, например  $X, A, X$ . Фазная зона обмотки вразвалку разделяется на две части, в которых лежат стороны различной длины — или короткие, или длинные. Катушки такой обмотки имеют укороченный шаг, причем наименьший среди всех остальных типов шаблонных обмоток.

3. *Цепные обмотки* (рис. 3.5, в) представляют собой разновидность шаблонных обмоток вразвалку, у которых развалка производится не по подгруппам, а по всем катушкам катушечной группы. Характерным признаком этих обмоток является непрерывное чередование коротких и длинных сторон соседних катушек по всей длине индуктора. При прочих равных условиях величина шага катушек цепной обмотки (длина катушки) меньше, чем у простой шаблонной, но больше, чем у обмотки вразвалку.

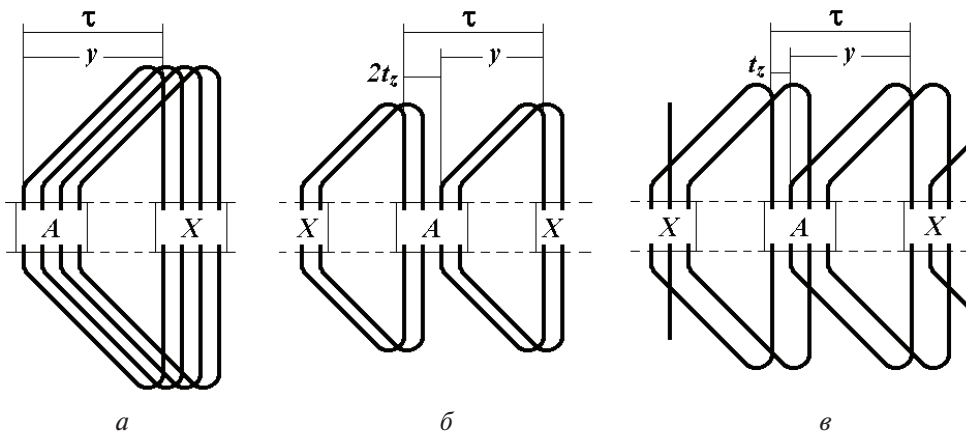


Рис. 3.5. Типы однослойных шаблонных обмоток круговых машин ( $q=4$ ):

а) простая шаблонная; б) шаблонная вразвалку; в) цепная

**Простые шаблонные обмотки.** В технологическом отношении простые шаблонные обмотки отличаются простотой укладки катушек и простыми междукатушечными соединениями. В то же время этот тип шаблонных обмоток требует наибольшего расхода обмоточного провода по причине полного шага катушек.

Пример схемы простой шаблонной обмотки приведен на рис. 3.6. На этой схеме все катушки обмотки изображены целиком, что для



круговой машины приводит к неизбежному повторению сторон, лежащих по обе стороны условного разреза цилиндрического статора. Такие повторяющиеся стороны катушек на схемах обмоток круговых машин (здесь и далее) обозначены порядковым номером своего паза со штрихом.

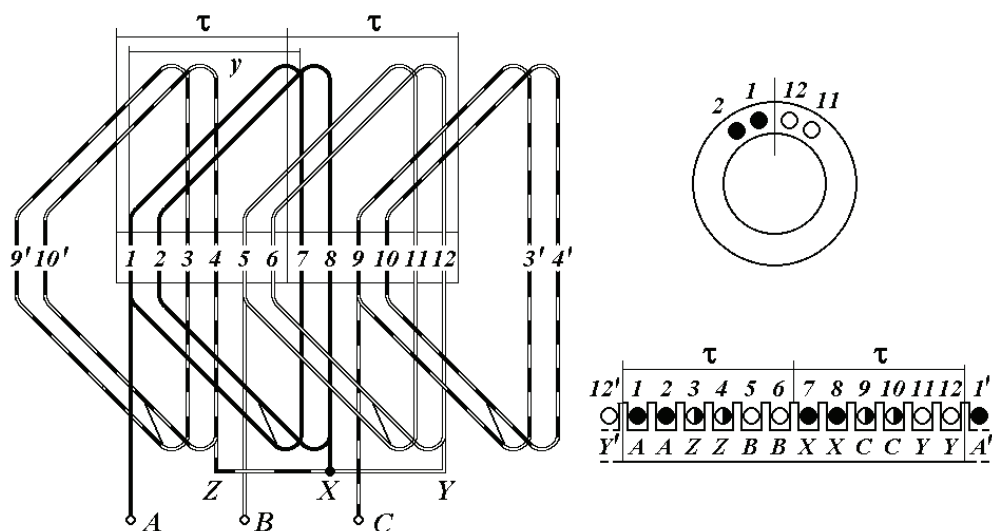


Рис. 3.6. Однослойная простая шаблонная обмотка ( $2p = 2, q = 2$ )

**Шаблонные обмотки вразвалку.** Этот тип обмоток может быть выполнен при только  $q > 1$ . Технологическим достоинством обмоток вразвалку является наибольшее возможное укорочение шага катушек, что дает снижение расхода меди за счет сокращения длины лобовой части. В электромагнитном отношении (формы кривой НС к величине коэффициента укорочения) при укороченном шаге катушек шаг этих обмоток — полный. К числу недостатков обмоток вразвалку следует отнести повышенную трудоемкость укладки катушек и сложность междукатушечных соединений. Пример схемы шаблонной обмотки вразвалку приведен на рис. 3.7.

**Цепные обмотки** имеют непрерывное чередование коротких и длинных сторон соседних катушек по всей длине индуктора (рис. 3.5, в).

Поэтому при  $q = 1$  все шаблонные обмотки, а при  $q = 2$  все обмотки вразвалку — цепные. Отметим, что цепные обмотки выполнимы только при нечетном шаге катушек ( $y = 3, 5, 7, \dots$ ).

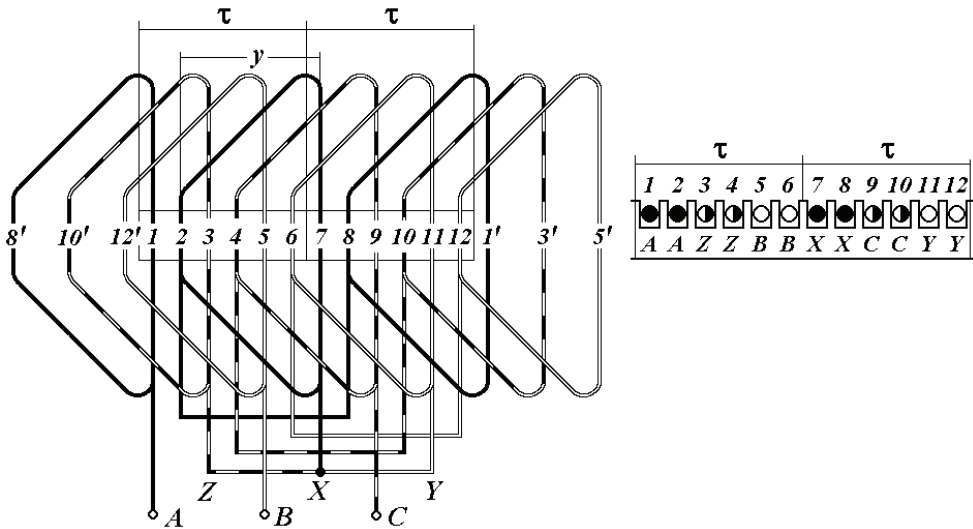


Рис. 3.7. Однослойная шаблонная обмотка вразвалку ( $2p = 2$ ,  $q = 2$ )

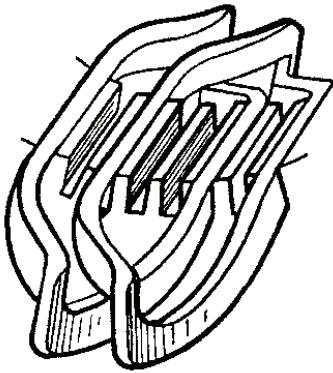


Рис. 3.8. Форма катушек цепной обмотки

Среди всех типов шаблонных обмоток цепные обладают ценным свойством — возможностью формовки несоприкасающихся лобовых частей катушек (подобно двухслойным), что повышает их надежность (рис. 3.8).

**Особенности шаблонных обмоток ЛИМ.** Основы построения обмоток индукторов ЛИМ такие же, как и в круговых. Однако обмотки ЛИМ имеют ряд особенностей.

Во-первых, в силу разомкнутости магнитопровода обмотки ЛИМ возможно выполнять как с четным, так и с нечетным числом полюсов (рис. 3.9).

Во-вторых, непосредственное применение шаблонных обмоток круговых машин (с чередованием сторон катушечных групп) для ЛИМ приводит к появлению *свободных сторон* обмотки — сторон катушек, лежащих вне пазов, за пределами магнитопровода. На схемах обмоток ЛИМ (рис. 3.9) свободные стороны обозначены цифрами с двумя штрихами.

Наличие свободных сторон в обмотках ЛИМ (всех типов — не только однослойных) увеличивает расход меди и создает дополнительные трудности с их креплением. Последнее обстоятельство немаловажно,

поскольку на свободные стороны крайних катушек воздействуют значительные нормальные усилия (силы Ампера). Кроме того, свободные стороны становятся своего рода лобовыми частями, что увеличивает магнитное поле рассеяния.

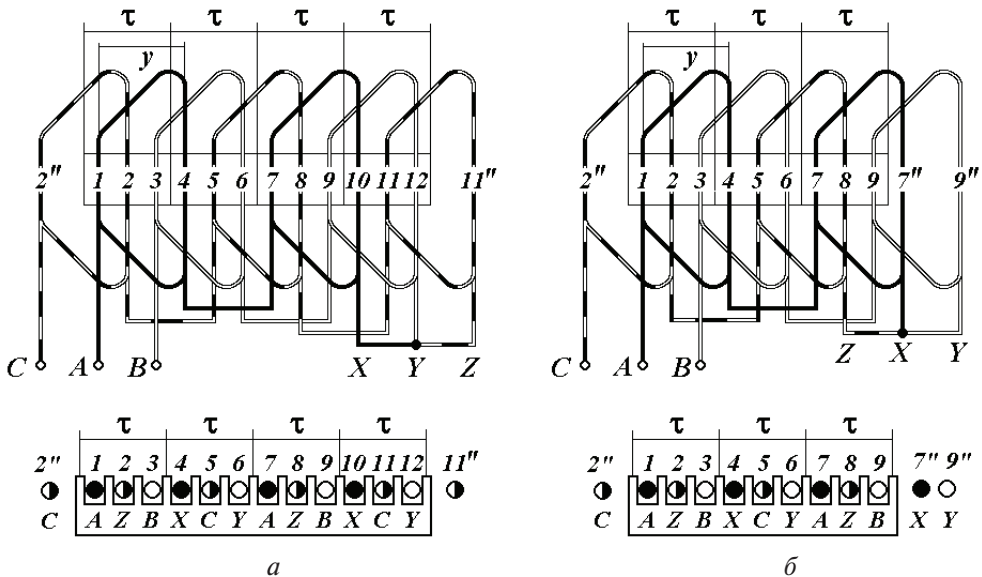


Рис. 3.9. Шестизонные шаблонные цепные обмотки ЛИМ с  $q = 1$ :

а)  $2p = 4$ ; б)  $2p = 3$

В то же время для цепных обмоток с  $q = 1$  при четном числе полюсов (рис. 3.9, а) свободные стороны несут токи средней фазы — С, что превращает эту обмотку в корректирующую — ослабляющую пульсирующее поле первичного краевого эффекта.

В-третьих, образование параллельных ветвей в обмотках со свободными сторонами сопряжено с неизбежным появлением уравнивающих токов по причине существенного различия сопротивлений и индуцированных ЭДС катушечных групп без свободных сторон и со свободными сторонами. Более того, в простых шаблонных и цепных обмотках ЛИМ количество катушечных групп в различных фазах неодинаково. Примером тому служит схема обмотки, приведенная на рис. 3.9, а, где в фазах А и В включены две катушечные группы, а в С — три.

Исключение свободных сторон в шаблонных обмотках ЛИМ возможно только при укладке катушек без чередования коротких и длинных сторон в фазных зонах (рис. 3.4, б). Однако такая укладка катушек

требует увеличения длины лобовых частей и значительно усложняет их формовку. Так, на рис. 3.12 показана схема обмотки ЛИМ, уложенной без чередования сторон, в которой одновременно пересекаются лобовые части трех катушек. Для упрощения формовки лобовых частей шаблонных обмоток ЛИМ катушки выполняют не трапециевидальной, а овальной формы. Отметим, что катушки такой обмотки могут иметь только полный шаг.

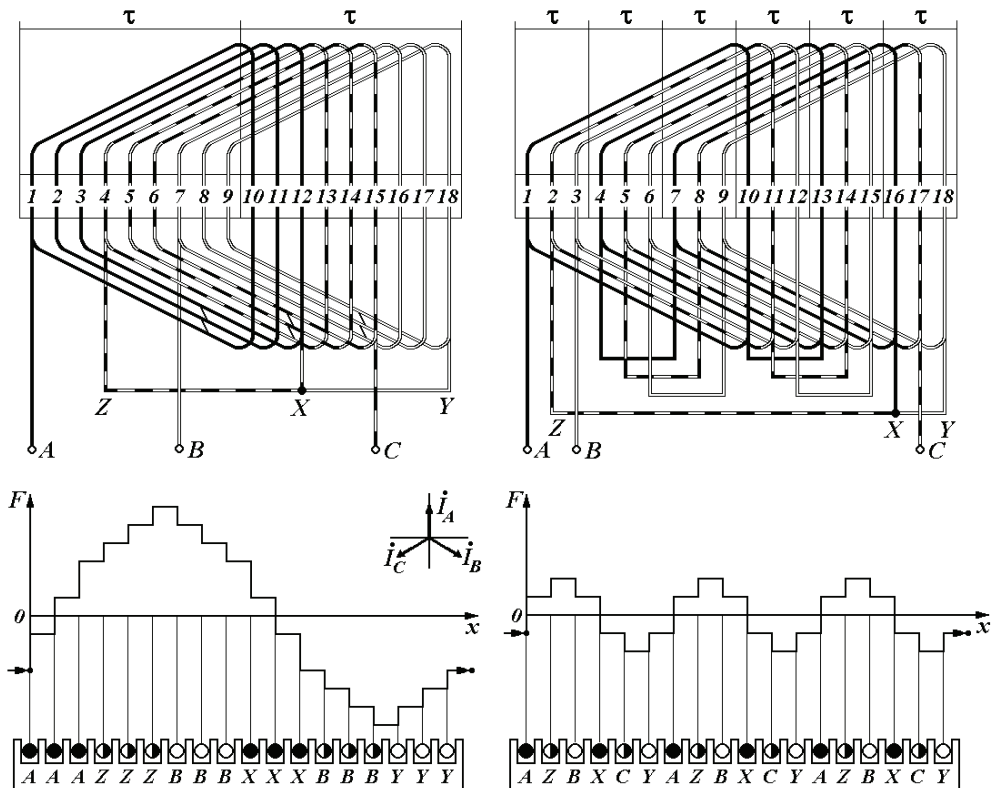


Рис. 3.10. Схемы и кривые НС шестизонной шаблонной обмотки ЛИМ:

а)  $2p = 2, q = 3$ ; б)  $2p = 6, q = 1$

В то же время отсутствие свободных сторон такого типа обмоток ЛИМ позволяет использовать в них как последовательное, так и параллельное соединение катушек.

Укажем еще одну частную особенность шаблонных обмоток для ЛИМ (не реализуемую в концентрических обмотках). При числе  $q$ , кратном 3, пересоединение катушек одной и той же обмотки позволяет

получить два значения полюсного деления с соотношением 1:3. Так, на рис. 3.10 приведены схемы и кривые НС шаблонной обмотки ЛИМ с  $Z = 18$ . В первом случае последовательное или параллельное соединение каждой трех соседних катушек образует двухполюсную обмотку с числом пазов на полюс-фазу  $q = 3$ , во втором случае последовательное соединение каждой третьей катушки образует шестиполюсную обмотку с  $q = 1$ .

Наглядное представление о конструкции шаблонных обмоток ЛИМ дает фотография индуктора ЛИМ, приведенная на рис. 3.11–3.12.

**Двухрядные шаблонные обмотки ЛИМ.** В заключение приведем схему еще одной обмотки (рис. 3.13), которую следовало бы отнести к отдельному типу двухрядных обмоток, где в пазу размещается две стороны катушек, но не одна под другой, а рядом [5].

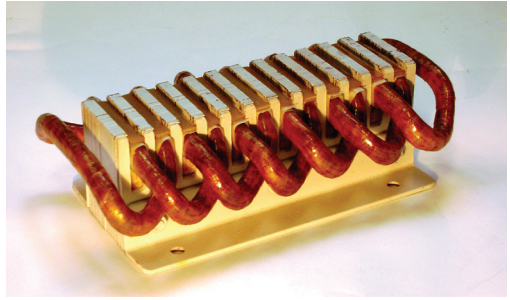


Рис. 3.11. Индуктор ЛИМ с однослойной цепной обмоткой ( $2p = 4, q = 1$ )

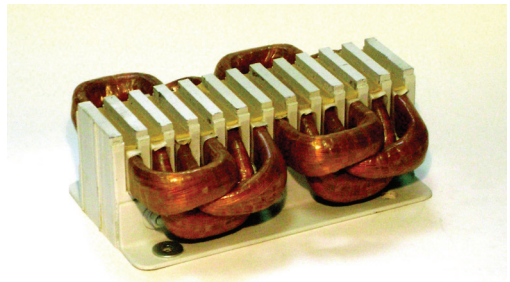


Рис. 3.12. Индуктор ЛИМ с однослойной шаблонной обмоткой без чередования сторон ( $2p = 4, q = 1$ )

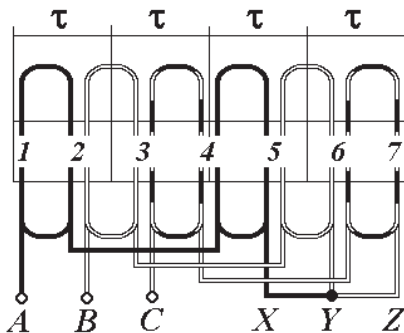


Рис. 3.13. Трехзонная двухрядная обмотка ( $2p = 4, q = 1$ )

К числу особенностей такой обмотки следует отнести то, что фазная зона у нее  $120^\circ$ , величина  $q = 1$ . При достаточно большом сокращении шага  $\beta = 2/3$  величина обмоточного коэффициента достаточно высока:

$$k_{об} = k_p k_y = 1 \cdot \sin \frac{180^\circ \cdot 2/3}{2} = 1 \cdot 0,866 = 0,866.$$

Основное достоинство этих обмоток технологического характера: их катушки имеют предельно простую плоскую форму.

### 3.2. Барабанные однослойные концентрические обмотки

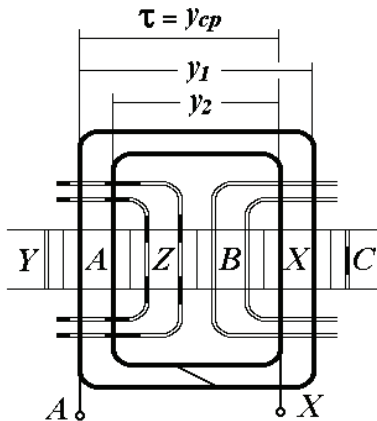


Рис. 3.14. Концентрическая обмотка

Однослойные концентрические обмотки имеют катушки и катушечные группы различной длины и формы (рис. 3.14). Катушечная группа концентрических обмоток образуется несколькими катушками, вложенными одна в другую. По этой причине катушки одной группы имеют различную величину шага.

**Технологические свойства концентрических обмоток.** Достоинством концентрических обмоток является возможность намотки катушек на шаблонах, придающих требуемую форму (отгиб) лобовых частей, до их укладки в магнитопровод (в отличие от шаблонных обмоток). Соответственно, такие технологические операции, как изолировка лобовых частей катушек, укладка обмотки в пазы, значительно упрощаются. Исключение операции ручной формовки лобовых частей позволяет использовать для изготовления концентрических обмоток проводники значительного сечения, как круглые, так и прямоугольные (при прямоугольных пазах магнитопровода).

В то же время значительное число типоразмеров катушек концентрических обмоток требует изготовления соответствующего числа шаблонов, что существенно увеличивает трудоемкость изготовления машины в целом при мелкосерийном и единичном производстве.

**Надежность.** Концентрические обмотки отличает повышенная надежность по причине отсутствия наложения лобовых частей катушек.

**Электрические свойства.** К недостаткам концентрических обмоток следует отнести сложность образования параллельных ветвей вследствие различных собственных сопротивлений катушек, а также (для трехплоскостных обмоток) несимметрию сопротивлений фаз.

**Виды концентрических обмоток** (рис. 3.15). В зависимости от способа укладки катушечных групп концентрические обмотки делятся:

- на двухплоскостные концентрические обмотки;
- трехплоскостные концентрические обмотки вразвалку;
- трехплоскостные концентрические обмотки для разъемных статоров;
- двухплоскостные концентрические обмотки с переменным шагом для ЛИМ.

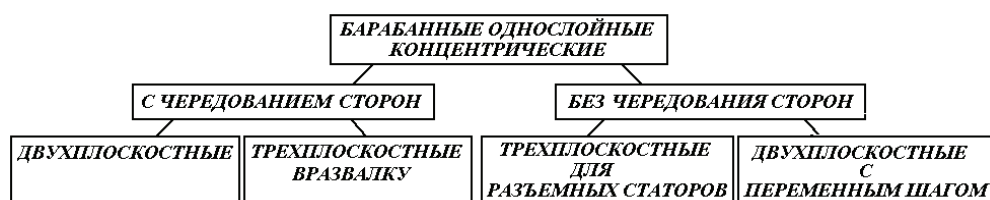


Рис. 3.15. Классификация однослойных концентрических обмоток

**Двухплоскостные концентрические обмотки** (рис. 3.16). Катушечная группа такой обмотки укладывается целиком так, что стороны всех ее катушек размещаются в соседних пазах. В пределах каждого полюсного деления катушечные группы различных фаз укладываются с чередованием правой и левой сторон. Катушечные группы обмотки выполняются двух типоразмеров — «короткие» и «длинные». Соответственно, лобовые части такой обмотки располагаются в двух плоскостях — длинные катушечные группы выполняются плоскими, а короткие — с отгибом лобовых частей.

Отметим следующую особенность двухплоскостных концентрических обмоток. При четном числе пар полюсов  $p$  во всех фазах будет одинаковое число коротких и длинных катушечных групп, что обеспечивает равенство активных и индуктивных сопротивлений всех фаз. Например, в обмотке с  $2p = 4$ , изображенной на рис. 3.16, а, каждая фаза состоит из одной короткой и одной длинной катушечной группы.



При нечетном  $p$  количество коротких и длинных катушечных групп во всех фазах будет различным. Более того, при нечетном  $p$  одна катушечная группа обмотки должна выполняться «кривой» или «переходной» — с разными длинами правой и левой сторон катушек. Таким образом, двухплоскостные concentрические обмотки с нечетным числом пар полюсов  $p$  всегда несимметричны — активные и индуктивные сопротивления лобового рассеяния всех фаз различны. Например, для обмотки с  $2p = 2$  (рис. 3.16, б) фаза  $A$  состоит из одной короткой катушечной группы, фаза  $B$  — из одной длинной, фаза  $C$  — из одной кривой.

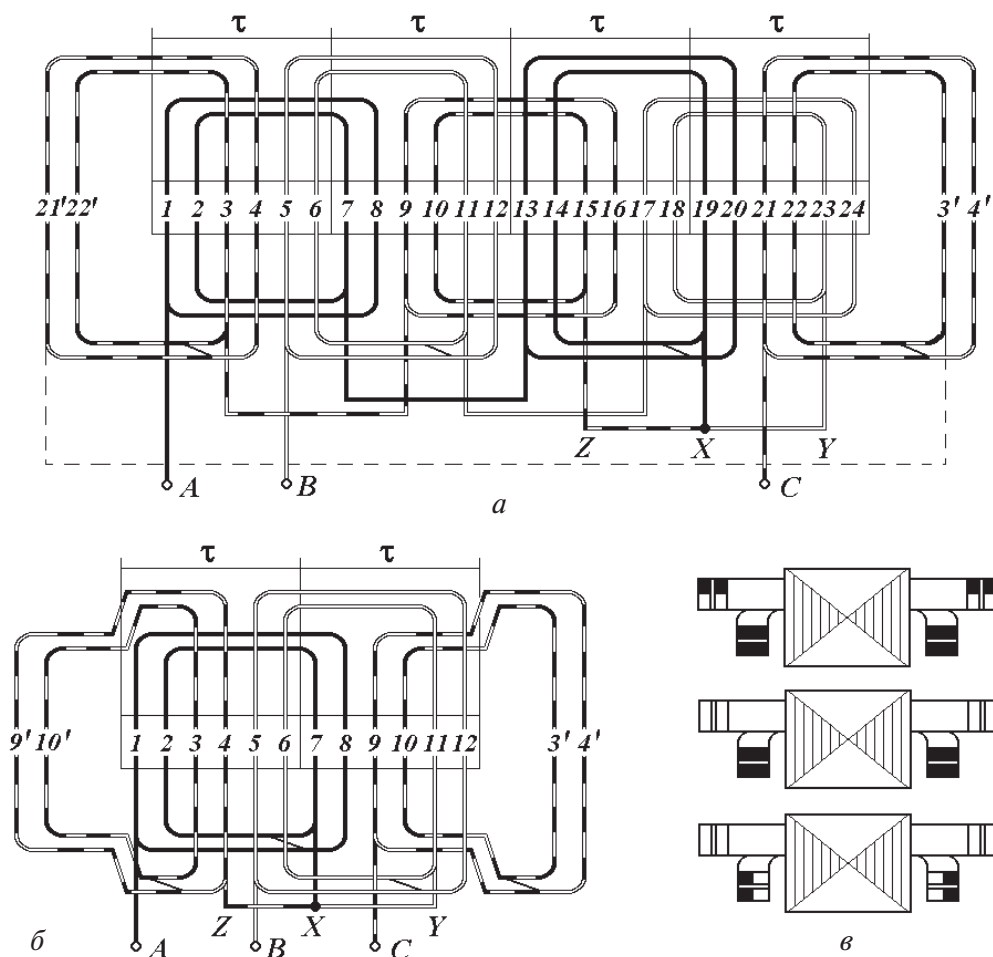


Рис. 3.16. Концентрические двухплоскостные обмотки:  
а)  $2p = 4$ ,  $q = 2$ ; б)  $2p = 2$ ,  $q = 2$ ; в) расположение лобовых частей



Другая особенность этой обмотки заключается в сложности образования параллельных ветвей, которое возможно только при условии равенства отношения  $p/2$   $a$  четному числу (условие равенства сопротивлений параллельных ветвей).

Как следует из рис. 3.16, использование этих обмоток в ЛИМ приводит к появлению свободных сторон средней фазы, что увеличивает расход обмоточного провода. В то же время такие обмотки для ЛИМ (в условиях мелкосерийного производства) достаточно технологичны, поскольку требуют только двух типоразмеров катушечных групп. Также применение таких обмоток в ЛИМ с нечетным  $p$  не требует изготовления кривых катушечных групп.

**Трехплоскостные концентрические обмотки вразвалку** (рис. 3.17). Катушечная группа такой обмотки разделяется на две подгруппы, катушки которых укладывают в противоположных направлениях (разваливают в разные стороны). Как и в шаблонных обмотках, развалка катушечной группы позволяет уменьшить величину среднего шага (подгруппы) и, таким образом, сократить длину лобовых частей. По этой причине обмотки вразвалку целесообразно применять при больших значениях числа пазов на полюс фазу ( $q = 6-10$ ).

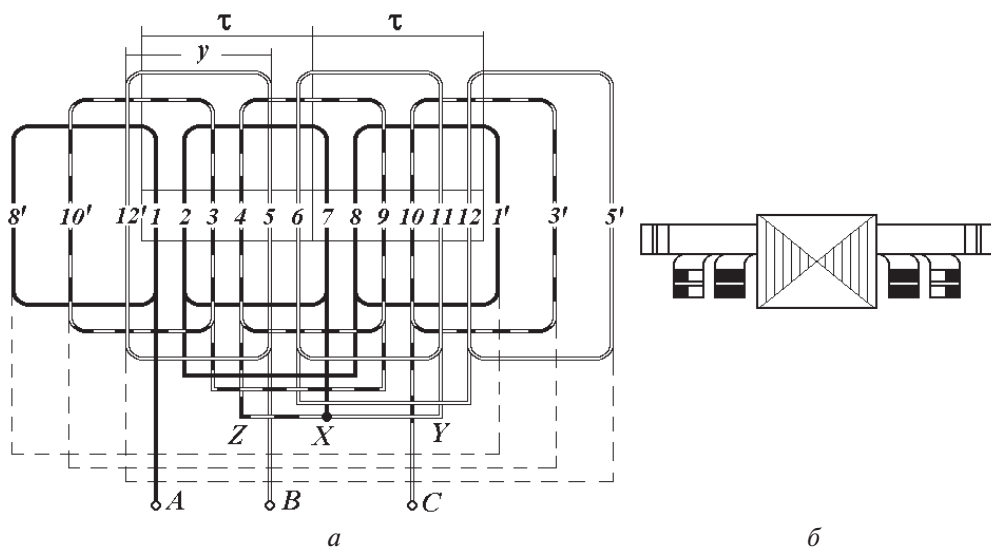


Рис. 3.17. Концентрическая трехплоскостная обмотка вразвалку ( $2p = 2$ ,  $q = 2$ ):

а) схема обмотки; б) расположение лобовых частей

Катушечные группы обмотки выполняются трех типоразмеров — короткие, средние и длинные. Соответственно, лобовые части такой обмотки располагаются в трех плоскостях — обычно длинные катушечные группы выполняются плоскими, а средние и короткие — с отгибом лобовых частей (рис. 3.17, б).

Особенностью этого типа обмотки является несимметрия фазных сопротивлений, поскольку каждая фаза составляется из катушечных групп только одного типоразмера. Так, для обмотки по рис. 3.17, а фаза *A* состоит из коротких катушечных групп, фаза *B* — из длинных, фаза *C* — из средних.

Образование параллельных ветвей таких обмоток для круговых машин не встречает затруднений, поскольку каждая катушечная группа развалена (разделена на две подгруппы).

**Трехплоскостные concentрические обмотки для разъемных статоров** (рис. 3.18). Катушечные группы этой обмотки укладываются без развалки и без чередования правой и левой сторон. Такой способ позволяет собирать индуктор из отдельных готовых модулей с уже уложенными секциями обмотки.

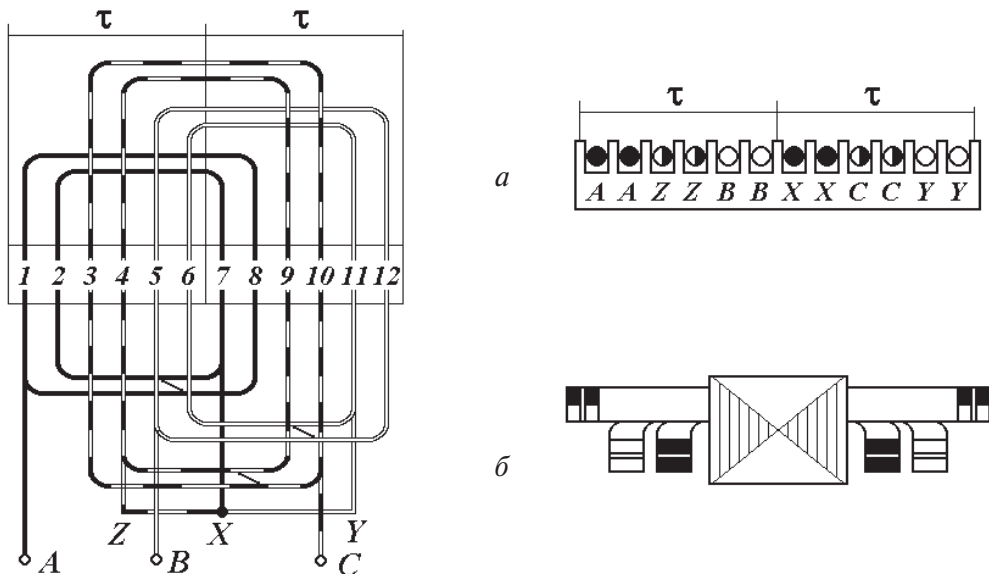


Рис. 3.18. Шестизонная concentрическая обмотка для разъемных статоров ( $2p = 2, q = 2$ ):

а) схема обмотки; б) расположение лобовых частей

Катушечные группы обмотки выполняются трех типоразмеров, что приводит к несимметрии сопротивлений фаз. Однако для многополюсных машин степень такой несимметрии может быть снижена периодической перестановкой коротких и средних катушечных групп из одной крайней фазы в другую на различных полюсах. Лобовые части обмотки располагаются в трех плоскостях.

Эти обмотки особенно удобны для применения в ЛИМ по причине отсутствия в них свободных сторон катушек.

**Двухплоскостные концентрические обмотки с переменным шагом** (рис. 3.19). Эти обмотки представляют собой разновидность концентрических обмоток для разъемных статоров, у которых катушечные группы крайних фаз выполняются с укорочением шага ( $\beta = 2/3$ ), а катушечная группа средней фазы имеет полный шаг ( $\beta = 1$ ).

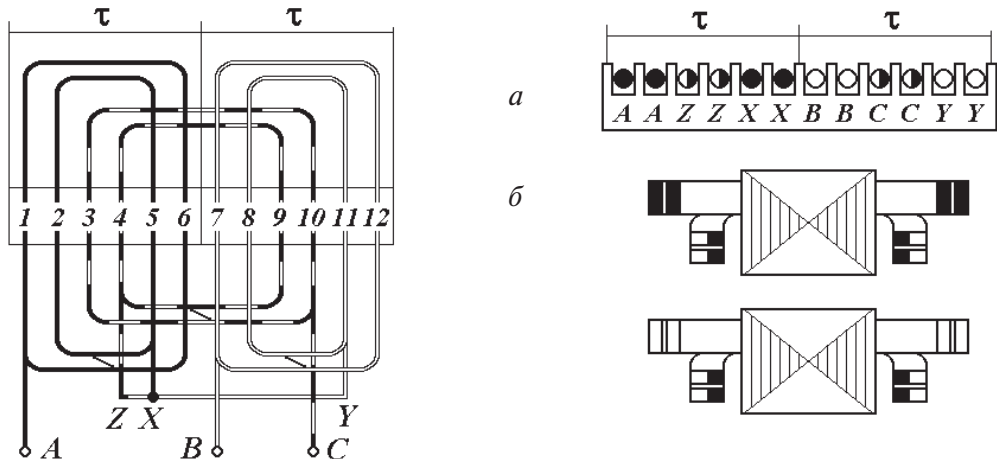


Рис. 3.19. Двухплоскостная концентрическая обмотка с переменным шагом ( $2p = 2, q = 2, \beta = 2/3 - 1 - 2/3$ ):

а) схемы обмотки; б) расположение лобовых частей

Обмотки с переменным шагом более технологичны, поскольку количество типоразмеров катушечных групп снижается до двух. Лобовые части этой обмотки располагаются в двух плоскостях (рис. 3.19, б).

Очевидный недостаток этих обмоток — некоторое ухудшение электромагнитных свойств, обусловленное значительным сокращением шага двух фаз и нарушением последовательности укладки сторон катушек —  $A-Z-X-B-C-Y$  (вместо  $A-Z-B-X-C-Y$  для шестизонных обмоток).

Нарушение последовательности чередования сторон приводит к искажению кривой НС, что прослеживается по рис. 3.19, где сопоставлены пространственные распределения НС обмоток с полным шагом (рис. 3.18) и переменным (рис. 3.19). Как следует из рис. 3.20, *a*, кривая НС обмотки с переменным шагом несимметрична, т. е. в ней присутствуют как нечетные, так и четные пространственные гармоники.

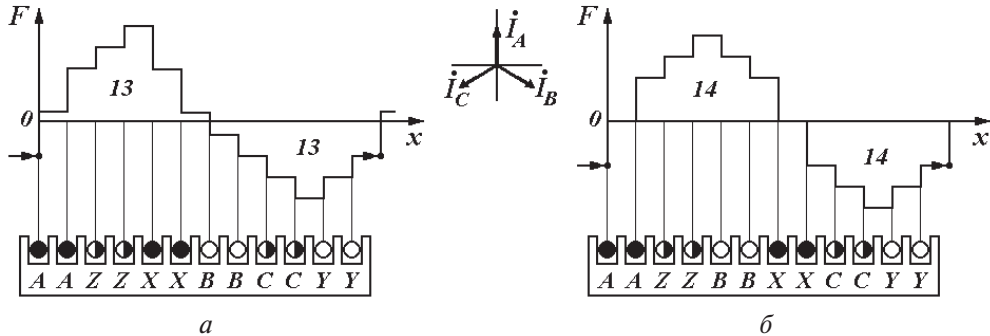


Рис. 3.20. Пространственные распределения НС обмоток ( $2p = 2, q = 2$ ):  
*a*) с переменным шагом; *б*) с полным шагом

Значительное сокращение шага катушечных групп крайних фаз снижает расчетную величину НС этой обмотки. Как показывает практика, обмоточный коэффициент таких обмоток допустимо определять как для обмоток с постоянным шагом при  $\beta = 2/3$ . Так, для обмотки, приведенной на рис. 3.19,

$$k_{об} = k_p k_y = \frac{\sin 30^\circ}{2 \sin 15^\circ} \cdot \sin \frac{2}{3} \cdot \frac{180^\circ}{2} = 0,965 \cdot 0,866 = 0,836,$$

по сравнению с обмоткой с полным шагом (рис. 3.18)

$$k_{об} = k_p k_y = \frac{\sin 30^\circ}{2 \sin 15^\circ} \cdot \sin \frac{180^\circ}{2} = 0,965 \cdot 1,0 = 0,965.$$

Внешний вид индуктора с однослойной concentрической обмоткой с переменным шагом приведен на рис. 3.21–3.22.

### 3.3. Двухслойные шаблонные обмотки

В двухслойных шаблонных обмотках стороны катушек укладываются в пазах в два слоя так, что одна сторона каждой катушки лежит

в нижнем слое, а другая — в верхнем (рис. 3.23, *а*). Такое размещение активных частей позволяет придавать одинаковую форму лобовым частям всех катушек обмотки, причем до их укладки в магнитопровод (рис. 3.23, *б*).

На схемах двухслойных обмоток стороны катушек, лежащих в нижней части паза, принято изображать пунктирной линией, а лежащих в верхней части — сплошной (рис. 3.23, *в*).

В отличие от однослойных барабанных обмоток, двухслойные шаблонные обмотки могут выполняться с различной шириной фазной зоны — как  $60^\circ$  (шестизонными), так и  $120^\circ$  (трехзонными).

**Особенности двухслойных шаблонных обмоток.** Двухслойные обмотки сочетают в себе ряд конструктивных и технологических достоинств однослойных обмоток — шаблонных и концентрических.

Подобно шаблонным однослойным обмоткам, двухслойные шаблонные обмотки круговых машин имеют одинаковую форму всех катушек, что обуславливает их высокую технологичность, а также возможность параллельного соединения катушек в фазе.

Подобно однослойным концентрическим, двухслойные шаблонные обмотки имеют повышенную надежность, поскольку катушки формуются и изолируются до укладки в магнитопровод, а уложенные не имеют соприкосновения с лобовыми частями соседних катушек.

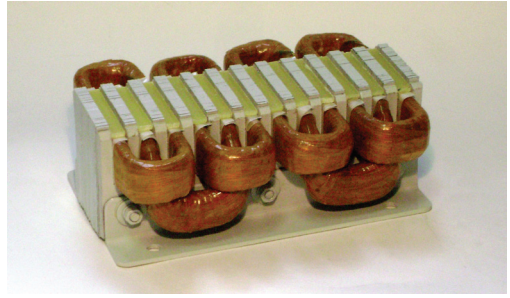


Рис. 3.21. Индуктор ЛИМ с шестизонной концентрической двухплоскостной обмоткой с переменным шагом ( $2p = 4$ ,  $q = 1$ ,  $\beta = 2/3 - 1 - 2/3$ )

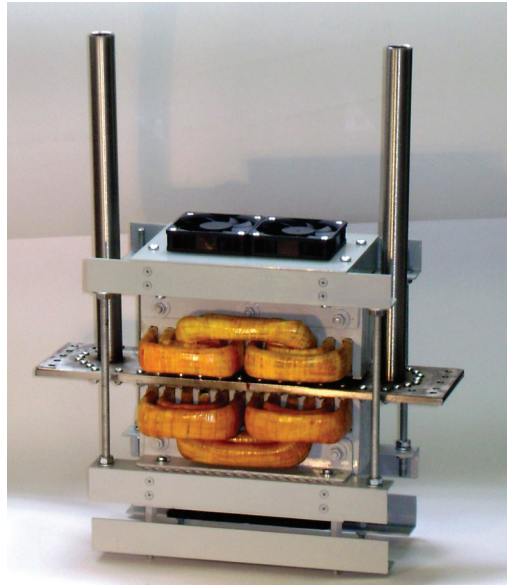


Рис. 3.22. Индуктор МГД-насоса с шестизонной концентрической двухплоскостной обмоткой с переменным шагом ( $2p = 2$ ,  $q = 2$ ,  $\beta = 2/3 - 1 - 2/3$ )

Определенный технологический недостаток этого типа обмоток состоит в усложнении укладки обмотки в пазы, поскольку верхние стороны катушек на первом полюсном делении необходимо держать на весу (поднимать первый шаг) до укладки нижних сторон последнего полюсного деления. Это обстоятельство не позволяет автоматизировать укладку двухслойных шаблонных обмоток.

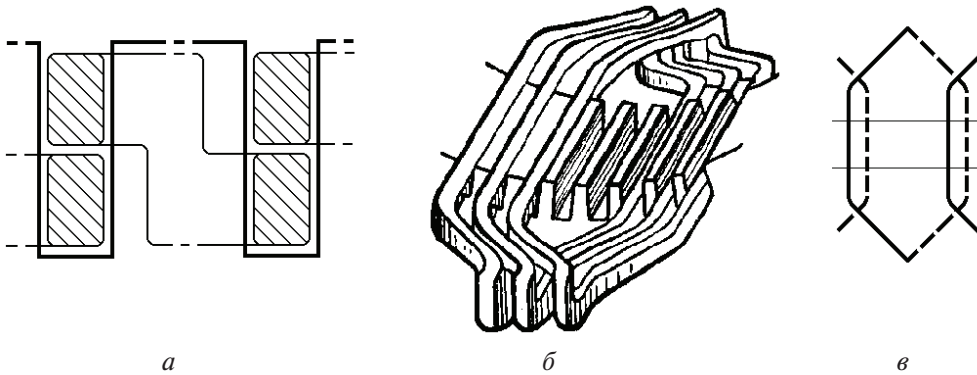


Рис. 3.23. Двухслойные шаблонные обмотки

Основным функциональным достоинством двухслойных обмоток является возможность сокращения их шага (коэффициента укорочения), что позволяет уменьшать расход обмоточного провода и снижать содержание высших гармоник в кривой магнитного поля.

**Шестизонные двухслойные шаблонные обмотки.** В  $60^\circ$ -х обмотках каждая пара полюсов  $2\tau$  состоит из шести фазных зон ( $A-Z-B-X-C-Y$ ), что позволяет размещать в каждом пазу только прямые ( $A, B, C$ ) или только обратные ( $X, Y, Z$ ) стороны двух катушек (рис. 3.24). Поскольку токи верхней и нижней сторон одного паза должны иметь одинаковое направление, то смежные катушки (одной фазы) должны соединяться:

- при последовательном соединении — одноименными выводами: с чередованием «Н»-«Н», «К»-«К», «Н»-«Н»... (рис. 3.25, а);
- при параллельном — разноименными выводами: «Н»-«К» («К»-«Н») (рис. 3.25, б).

В шестизонных двухслойных обмотках изменение шага катушки приводит к изменению шага обмотки (коэффициента укорочения). В качестве примера рассмотрим обмотки с полным  $\beta = 1$  и укороченным шагом  $\beta = 5/6$ , схемы и кривые НС которых приведены на рис. 3.26. Видно, что укорочение шага шестизонных обмоток (сме-

шение фазных зон верхних и нижних сторон катушек относительно друг друга) благоприятно сказывается на форме пространственного распределения НС, приближая его к синусоидальному.

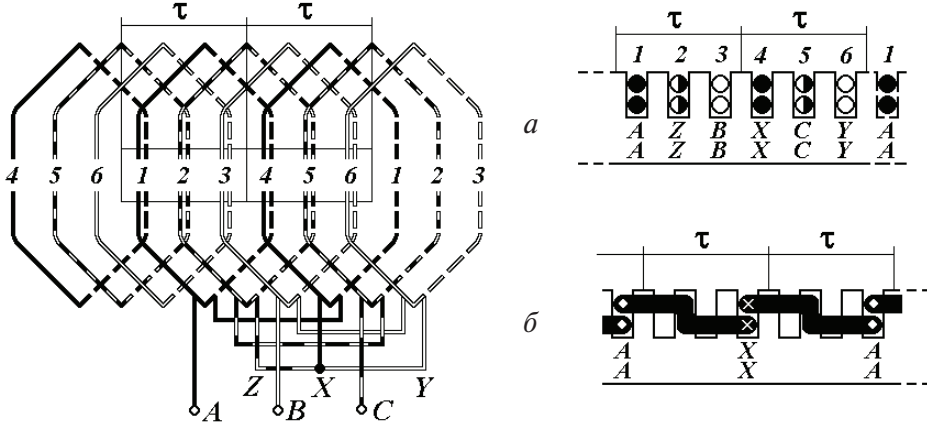


Рис. 3.24. Построение двухслойных шестизонных обмоток ( $2p = 2, q = 1$ )

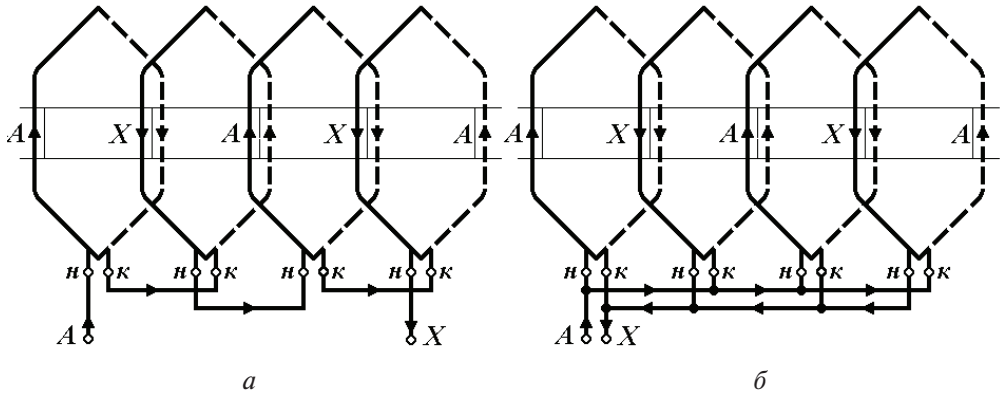


Рис. 3.25. Соединение катушек шестизонных двухслойных обмоток:

а) последовательное; б) параллельное

В то же время сокращение шага снижает амплитуду первой гармоники НС обмотки (обмоточного коэффициента). Так, для обмотки с полным шагом (рис. 3.26, а) величина обмоточного коэффициента составляет

$$k_{об} = k_p k_y = \frac{\sin 30^\circ}{2 \sin 15^\circ} \cdot \sin \frac{1 \cdot 180^\circ}{2} = 0,965 \cdot 1,0 = 0,965,$$

а с укороченным (рис. 3.26, б) —

$$k_{об} = k_p k_y = \frac{\sin 30^\circ}{2 \sin 15^\circ} \cdot \sin \frac{5}{6} \cdot \frac{180^\circ}{2} = 0,965 \cdot 0,966 = 0,932.$$

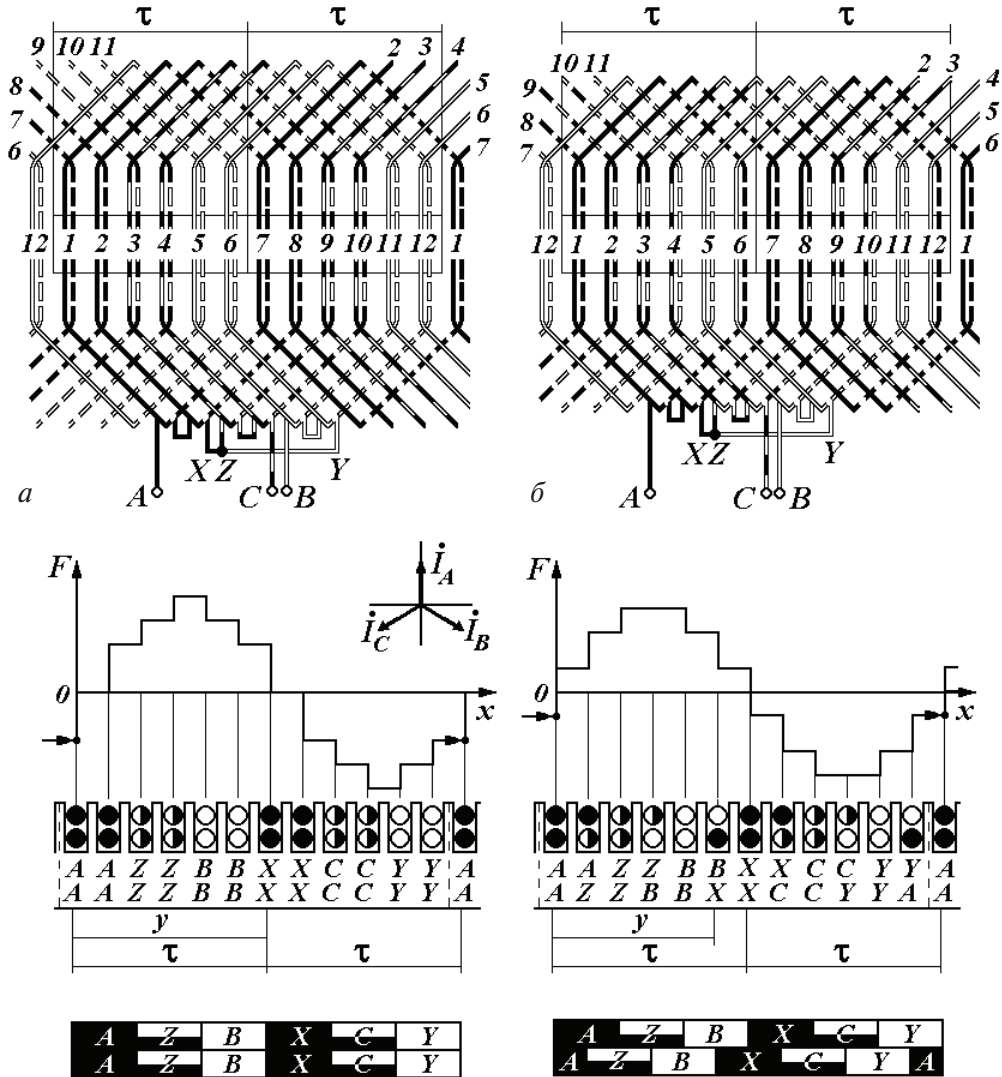


Рис. 3.26. Схемы, кривые НС и распределения фазных зон шестизонных двухслойных обмоток ( $2p = 2, q = 2$ ):

а) с полным шагом; б) с укороченным шагом



**Трехзонные двухслойные шаблонные обмотки.** В трехзонных обмотках каждая пара полюсов  $2\tau$  состоит из трех фазных зон с токами, сдвинутыми относительно друг друга на  $120^\circ$ . В чистом виде трехзонные обмотки могут быть выполнены только кольцевыми, в которых обратные стороны катушек ( $X, Y, Z$ ) вынесены за пределы активной зоны индуктора (рис. 3.27, а). В отличие от кольцевых, в барабанных обмотках прямые ( $A, B, C$ ) и обратные ( $X, Y, Z$ ) стороны катушек должны размещаться в пазах магнитопровода (активной зоне), т. е. образовывать шесть фазных зон. Поэтому выполнение трехзонных барабанных обмоток возможно лишь одним способом — пространственным совмещением прямых и обратных фазных зон различных фаз, например  $AZ-BX-CY$  (рис. 3.27, б).

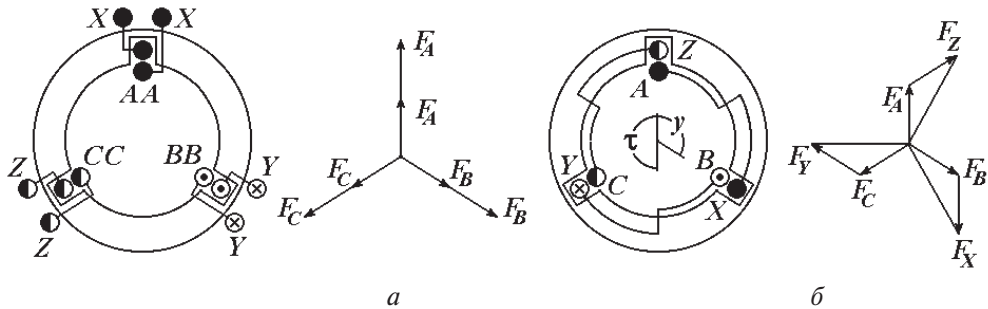


Рис. 3.27. Трехзонные обмотки:

а) кольцевые; б) барабанные

Особенности построения трехзонных барабанных обмоток представлены на рис. 3.28, где приведены схема простейшей трехзонной обмотки (рис. 3.28, а), размещение проводников фаз в пазах (рис. 3.28, б), соединение катушек в фазе (рис. 3.28, в).

Указанные особенности образования трехзонных барабанных обмоток определяют их следующие свойства.

Во-первых, «естественный» шаг катушек обмотки (единственно возможный при  $q = 1$ ) составляет  $2/3\tau$  ( $\beta = 0,67$ ), т. е. является укороченным — меньше полюсного деления (рис. 3.27, б).

Во-вторых, размещение во всех пазах индуктора проводников двух различных фаз (с различными фазами токов) приводит к значительному снижению величины НС трехзонных барабанных обмоток по сравнению с трехзонными кольцевыми и шестизонными (рис. 3.27, б).

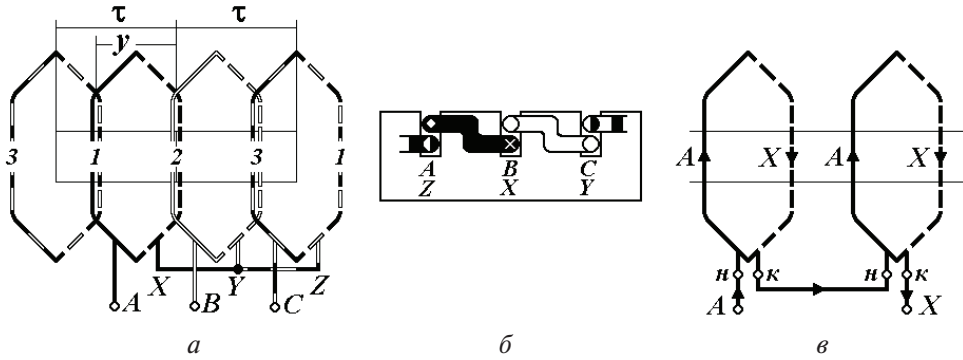


Рис. 3.28. Построение трехзонных двухслойных шаблонных обмоток

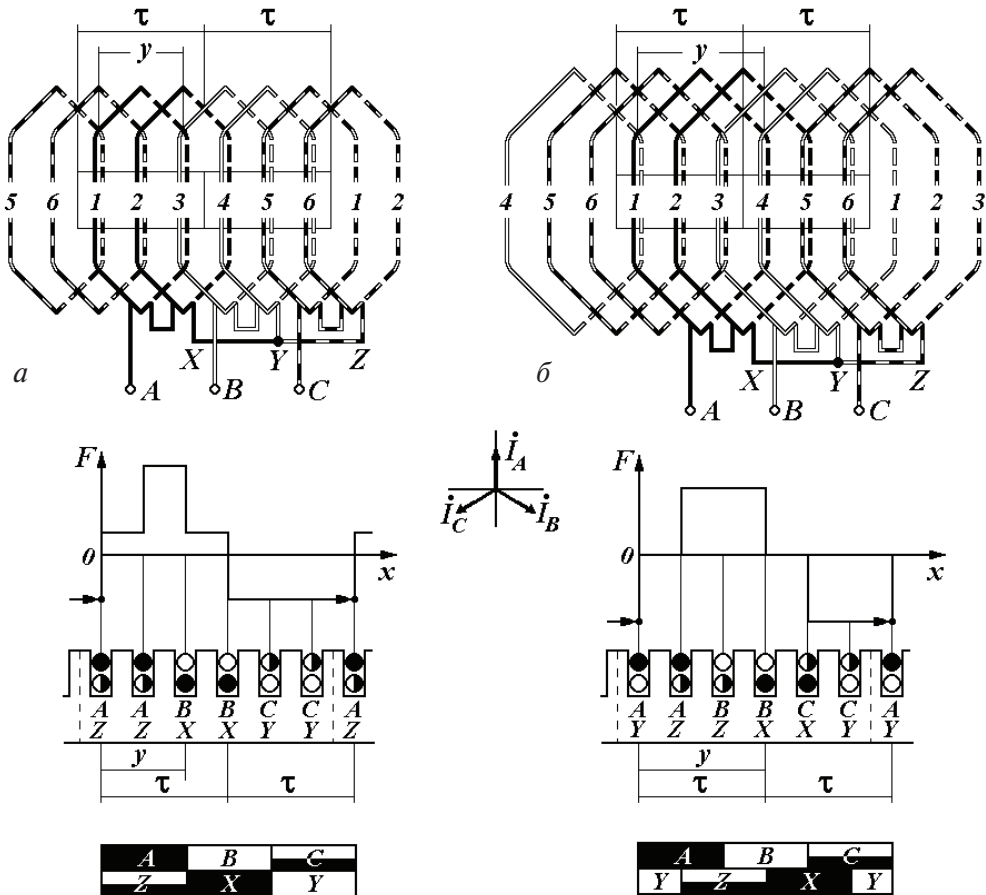


Рис. 3.29. Схемы, кривые НС и распределения фазных зон трехзонных двухслойных обмоток ( $2p = 2$ ,  $q = 2$ ):

а) с укороченным шагом; б) с полным шагом

В-третьих, в отличие от шестизонных обмоток, для трехзонных укорочение шага ухудшает форму кривой НС, которая становится несимметричной (рис. 3.29, а). Наоборот, применение полного шага позволяет избавиться от четных гармоник (рис. 3.29, б).

В силу значительного содержания высших пространственных гармоник магнитного поля применения трехзонных обмоток в ЭМ стараются избегать. Не находя применения в чистом виде, трехзонные обмотки, однако, используются как одно из состояний более сложных полюсно-переключаемых обмоток многоскоростных асинхронных двигателей (АД). В этих обмотках посредством пересоединения отдельных частей возможно образование шести или трех фазных зон, что дает два значения полюсного деления в соотношении 1/2 (рис. 3.30).

$\tau$			$\tau$		
$60^\circ$					
A	Z	B	X	C	Y
Z	B	X	C	Y	A

а

$\tau$		$\tau$		$\tau$		$\tau$	
$120^\circ$							
A	C	B	A	C	B		
Z	Y	X	Z	Y	X		

б

Рис. 3.30. Полюсное деление в соотношении 1/2:

а)  $60^\circ$ ; б)  $120^\circ$

**Особенности двухслойных обмоток ЛИМ.** Двухслойные шаблонные обмотки ЛИМ могут быть выполнены или со свободными сторонами крайних катушек (рис. 3.31, б), или с полузаполненными пазами на краях индуктора (рис. 3.31, в).

Чаще используют индукторы с полузаполненными крайними пазами. В этом случае распределение линейной токовой нагрузки по длине индуктора получается неравномерным — в двух крайних полюсах величина линейной токовой нагрузки будет в два раза ниже, чем в остальных.

Как и другие типы обмоток, двухслойные обмотки ЛИМ возможно выполнять как с четным числом полюсов  $2p$  (рис. 3.31), так и с нечетным (рис. 3.32).

В этой связи отметим следующую особенность образования параллельных ветвей двухслойных обмоток индукторов ЛИМ. Поскольку в катушках, лежащих на краях магнитопровода, величина индуцированной ЭДС отличается от ЭДС катушек, размещенных в середине, то для исключения уравнительных токов целесообразно обмотку разбивать не более чем на две параллельные ветви. Каждая параллельная

ветвь должна содержать одинаковое количество последовательно соединенных крайних и средних катушек. Для обмоток ЛИМ с нечетным числом полюсов  $2p = 3, 5 \dots$  образование двух параллельных ветвей не вызывает затруднений, поскольку число катушек такой обмотки всегда четное. Для двухслойных обмоток с четным числом полюсов  $2p = 2, 4 \dots$  разделение на две параллельные ветви возможно лишь при четном числе пазов на полюс-фазу  $q = 2, 4$  и т. д. (рис. 3.33).

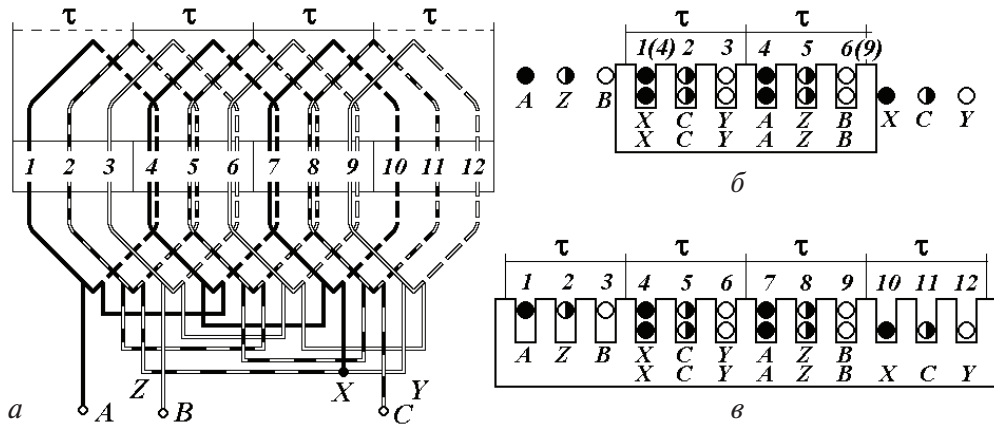


Рис. 3.31. Шестиполюсная шаблонная двухслойная обмотка ЛИМ:

а) схема; б) индуктор со свободными сторонами  $2p = 2$ ; в) индуктор с полузаполненными крайними пазами  $2p = 4$

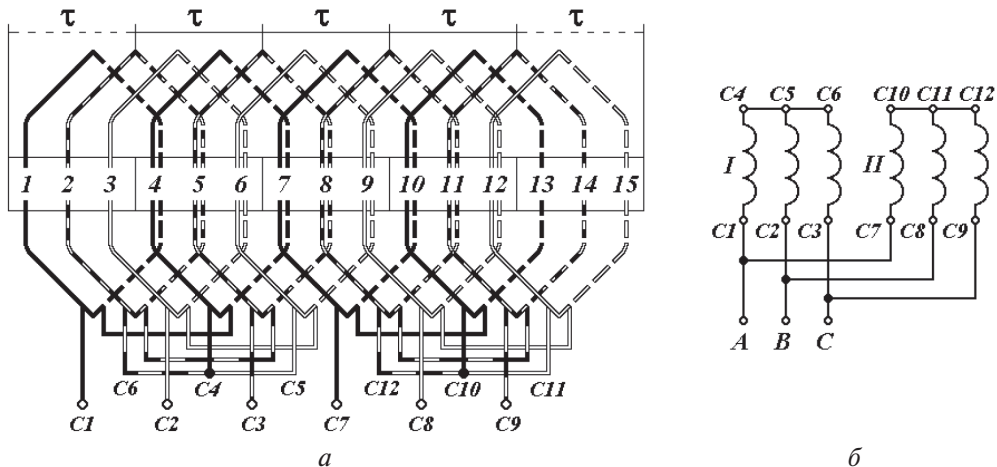


Рис. 3.32. Шестиполюсная шаблонная двухслойная обмотка ЛИМ ( $2p = 5$ ):

а) схема; б) образование параллельных ветвей

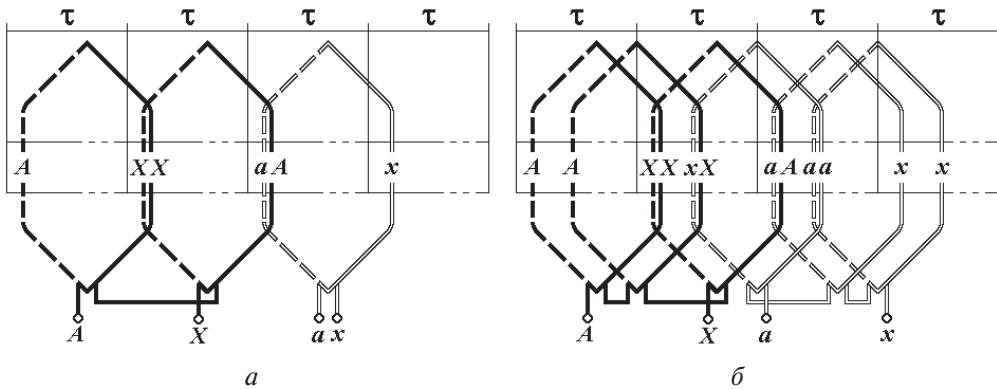


Рис. 3.33. Особенности образования параллельных ветвей двухслойных обмоток ЛИМ с четным  $p$ :

а) с нечетным  $q$ ; б) с четным  $q$

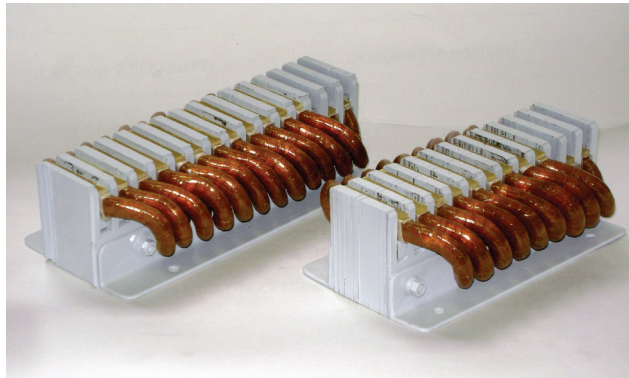


Рис. 3.34. Индукторы ЛИМ с двухслойными шаблонными обмотками с полузаполненными крайними пазами  $2p = 5$  и  $2p = 4$  ( $q = 1$ )

Внешний вид индукторов ЛИМ с двухслойными обмотками с полузаполненными крайними пазами показан на рис. 3.34.

### 3.4. Двухслойные концентрические обмотки

В круговых машинах применение двухслойных концентрических обмоток позволяет автоматизировать операцию их укладки в магнитопровод статора (исключить подъем верхних сторон первого шага). По своим свойствам (надежности изоляции лобовых частей, возмож-

ности сокращения шага) двухслойные concentрические обмотки круговых машин подобны шаблонным и поэтому далее не рассматриваются. Более подробные сведения о таких обмотках приведены в [2, 3].

**Двухслойные concentрические одноплоскостные обмотки для ЛИМ.** Отличительной особенностью таких обмоток является размещение противоположных сторон катушечной группы только в одном слое — или в верхнем, или в нижнем (рис. 3.35).

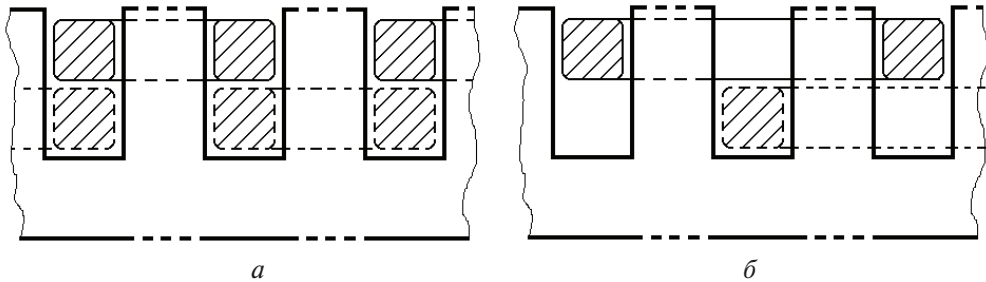


Рис. 3.35. Одноплоскостные двухслойные concentрические обмотки:  
а) с полным заполнением пазов; б) с частично заполненными пазами

**Особенности двухслойных одноплоскостных concentрических обмоток ЛИМ.** Основное достоинство этого типа обмоток — технологического свойства, состоит в предельно простой форме катушек — плоской без отгиба лобовых частей. В этом отношении эти обмотки можно определить как *concentрические одноплоскостные*. Кроме того, длина и вылет лобовых частей таких обмоток меньше, чем у обычных.

Обратной стороной упрощения конструкции этого типа обмоток становится существенное снижение НС в силу значительного сокращения шага или снижения линейной токовой нагрузки за счет неполного использования сечения паза.

**Виды concentрических одноплоскостных двухслойных обмоток ЛИМ.** В зависимости от способа укладки катушечных групп эти обмотки делятся:

- на обмотки с полным заполнением пазов (рис. 3.35, а);
- обмотки с частично заполненными пазами (рис. 3.35, б).

**Области применения.** Использование обмоток с плоскими катушками и малым вылетом лобовых частей зачастую становится вынужденным, но единственно возможным решением для следующих типов ЛИМ.

1. Тяговые ЛИМ с опорой на колесо, испытывающие регулярные механические удары при движении (на стыках рельсов) со значительными ускорениями. Такие удары приводят к постоянной раскачке лобовых частей катушек относительно магнитопровода и, как следствие, к повреждению изоляции или обрыву проводников обмотки на выходе из паза. По этой причине чисто конструктивная задача — уменьшение величины вылета лобовой части обмотки — становится одной из определяющих при проектировании таких ЛИМ.

2. ЛИМ для воздействия на жидкие металлы (МГД-насосы, МГД — перемешивающие устройства), где высокие температуры жидкого металла — якоря ИМ — представляют опасность для изоляции обмоток индукторов.

Снижение разрушительного воздействия высоких температур на изоляцию проводников обмотки индуктора возможно двумя путями.

1. Применение тепловой изоляции между каналом МГД-машины и ее индуктором, что в конструктивном отношении соответствует увеличению воздушного зазора. Этот путь ведет к значительному увеличению линейной токовой нагрузки вплоть до необходимости применения внутрипроводникового водяного охлаждения для получения требуемых значений индукции в металле. Поэтому для магнитопроводов таких ЛИМ характерны весьма глубокие и широкие пазы при относительно узких зубцах. Соответственно, увеличиваются сечения полых проводников катушек, что крайне усложняет или делает технологически невыполнимым изгиб лобовых частей в нескольких плоскостях, требуемый для обычных однослойных и двухслойных обмоток.

2. Сохранение относительно небольших воздушных зазоров при использовании высокотемпературных неорганических изоляций, как правило, хрупких и не допускающих операции изгиба уже изолированного проводника. В этом случае нанесение такой изоляции на катушки простейшей — плоской — формы существенно упрощается.

**Концентрические одноплоскостные обмотки с полным заполнением пазов.** Выполнение таких обмоток [5] возможно только при значительном сокращении их относительного шага  $\beta$ , что обуславливает крайне низкие значения обмоточного коэффициента  $k_{об}$ . Так, на рис. 3.36 приведена схема обмотки, в которой чередование нижних и верхних сторон соседних катушечных групп создает последовательность *AAZZB-BXXCCYY*, т. е. шестизонную обмотку с относительным шагом  $\beta = 1/3$ .

Величина обмоточного коэффициента вследствие значительного сокращения шага весьма мала:

$$k_{об} = k_p k_y = \frac{\sin 30^\circ}{2 \sin 15^\circ} \cdot \sin \frac{1}{3} \cdot \frac{180^\circ}{2} = 0,965 \cdot 0,5 = 0,482. \quad (3.1)$$

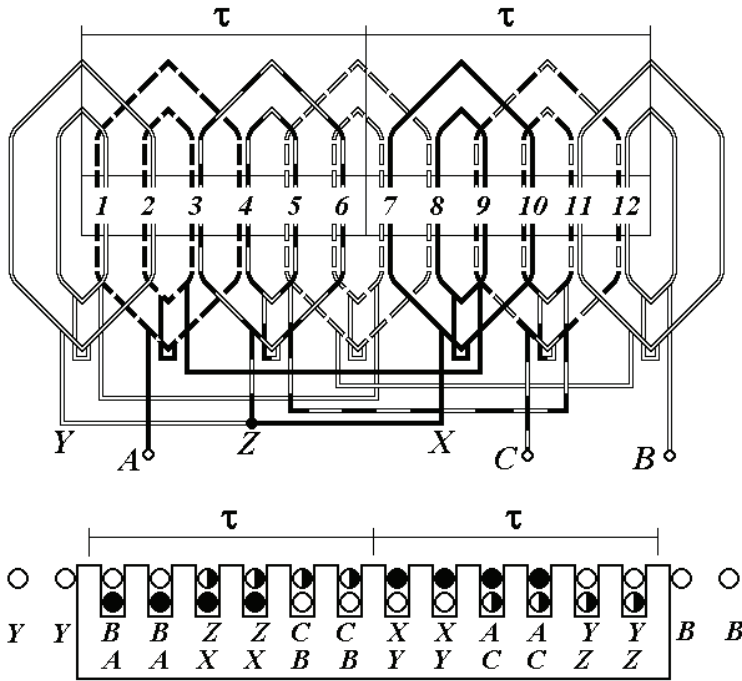


Рис. 3.36. Шестизонная двухслойная концентрическая обмотка ЛИМ ( $2p = 2, q = 2, \beta = 1/3$ )

Отметим следующую особенность этой обмотки — возможность получения последовательности сторон *AABBCCAABBCC*, т. е. трехзонной обмотки с  $\beta = 2/3$ , простым переключением зажимов катушечных групп фаз (рис. 3.37, б). При таком включении число пар полюсов увеличивается в два раза. Величина обмоточного коэффициента трехзонной обмотки значительно выше предыдущей:

$$k_{об} = k_p k_y = \frac{\sin 60^\circ}{2 \sin 30^\circ} \cdot \sin \frac{2}{3} \cdot \frac{180^\circ}{2} = 0,866 \cdot 0,866 = 0,75. \quad (3.2)$$

Однако столь значительный выигрыш в абсолютной величине НС этой обмотки отчасти теряется в силу значительного содержания выс-



ших пространственных гармоник поля, присущих всем трехзонным обмоткам (рис. 3.37, б).

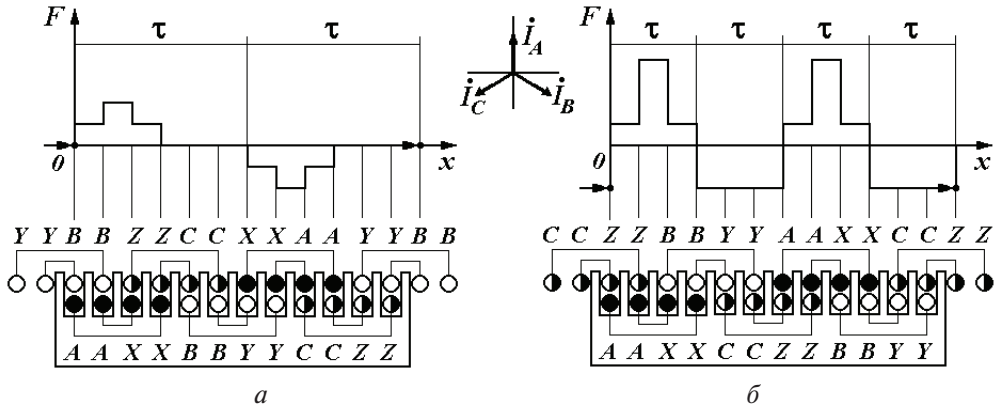


Рис. 3.37. Двухслойные концентрические обмотки ЛИМ:

- а) шестизонная ( $2p = 2, q = 2, \beta = 1/3$ );
- б) трехзонная ( $2p = 4, q = 2, \beta = 2/3$ )

Внешний вид индуктора ЛИМ с двухслойной концентрической обмоткой приведен на рис. 3.38.

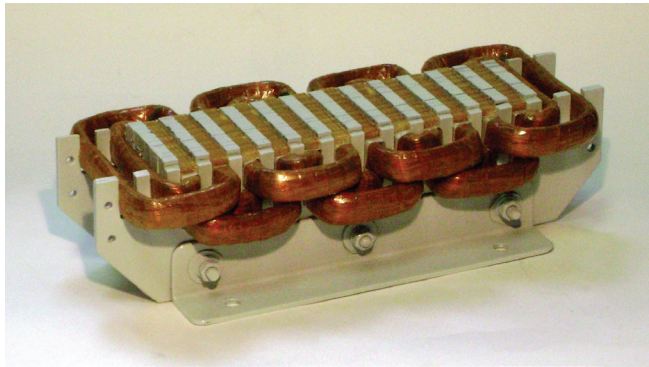


Рис. 3.38. Индуктор ЛИМ с двухслойной концентрической обмоткой с полным заполнением пазов

**Двухслойные обмотки ЛИМ с частично заполненными пазами.** В этом типе обмоток катушечные группы двух фаз укладываются попарно — или в верхнюю часть паза, или в нижнюю. Такие обмотки могут выполняться как с полным шагом (рис. 3.39, а), так и с укороченным (рис. 3.39, б).

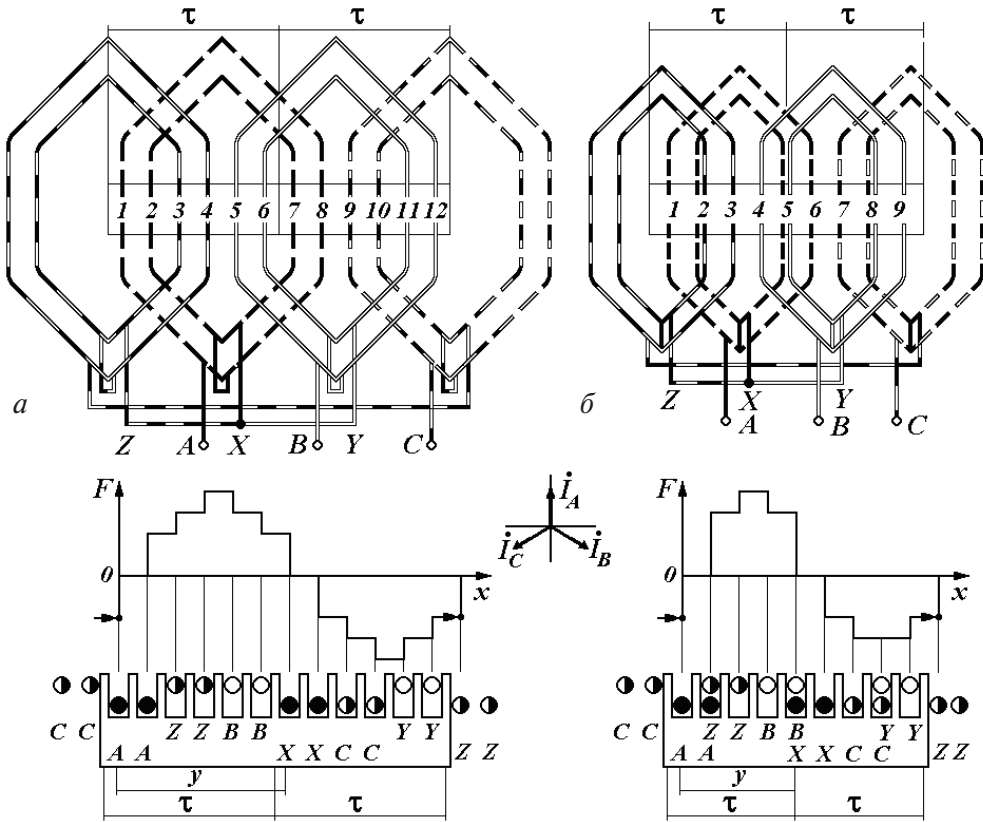


Рис. 3.39. Схемы и распределения НС двухслойных концентрических обмоток ЛИМ с частичным заполнением пазов ( $2p = 2$ ,  $q = 2$ ):  
 а) с полным шагом,  $\beta = 1$ ; б) с укороченным шагом,  $\beta = 5/6$

Укорочение шага приводит к несимметрии кривой НС (появлению четных гармоник поля), однако этот недостаток искупается некоторым увеличением линейной нагрузки индуктора, поскольку часть пазов становится полностью заполненной.

Отметим следующую особенность концентрических одноплоскостных обмоток. Как следует из рис. 3.40, сокращение шага катушек приводит к изменению числа пазов индуктора, чего не происходит в других типах обмоток. Так, при полном шаге индуктор с  $2p = 4$  и  $q = 2$  имеет 12 пазов (рис. 3.39, а), а такой же индуктор с укороченным шагом имеет 9 пазов (рис. 3.39, б). По этой причине применение формулы (1.5) [2] величины  $q$  для этих обмоток становится *неправильным*, и величину числа пазов на полюс-фазу следует находить исходя из ее определения:

$$q = \frac{\tau}{mt_z}.$$

Конструктивный недостаток этих обмоток — наличие свободных сторон. В то же время этот конструктивный недостаток оборачивается определенным улучшением электромагнитных свойств, поскольку свободные стороны обмотки составляют корректирующую обмотку, подавляющую пульсирующую составляющую магнитного поля в зазоре.

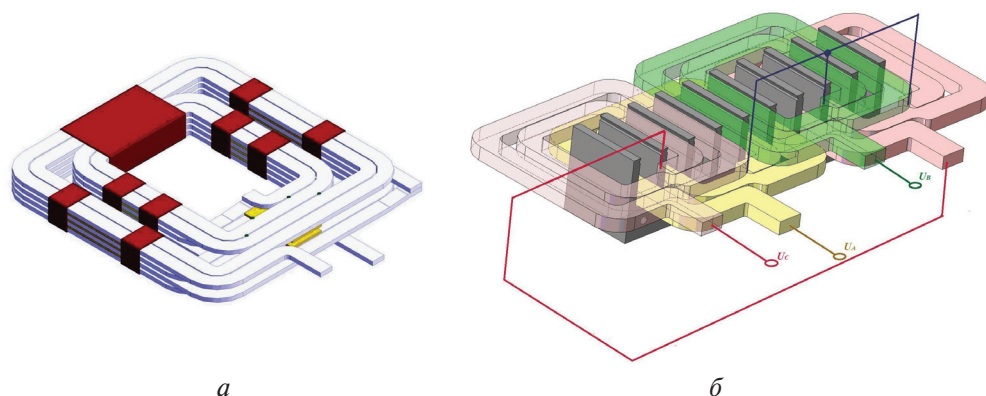


Рис. 3.40. Конструкция двухслойных concentрических одноплоскостных обмоток ЛИМ:

а) катушечная группа  $q = 2$ ; б) трехфазная обмотка

Технологической особенностью одноплоскостных concentрических обмоток с частично заполненными пазами является возможность применения немоточного способа изготовления катушек и катушечных групп [7, 8]. При этом слои катушки вырезаются из листового проводникового материала (меди или алюминия) методами штамповки, гидроабразивной или лазерной резки. Полученные заготовки покрываются изоляцией и собираются послойно с последующим соединением слоев пайкой или сваркой.

Внешний вид катушечной группы для обмотки по рис 3.39, б ( $w_k = 8$ ,  $q = 2$ ), выполненной по такой технологии, показан на рис. 3.40, а. На рис. 3.40, б показана конструкция трехфазной обмотки, составленной из таких катушечных групп.

**Сопоставление шестизонных обмоток с полным заполнением паза и частично заполненным с полным шагом.** Шестизонные обмотки с полузаполненными пазами с полным шагом имеют линейную токовую

нагрузку в два раза ниже (при прочих равных условиях), чем обмотки с полными пазами. Однако коэффициент укорочения для них в два раза больше, чем у последних (3.1):

$$k_{об} = k_p k_y = \frac{\sin 30^\circ}{2 \sin 15^\circ} \cdot \sin \frac{1 \cdot 180^\circ}{2} = 0,965 \cdot 1,0 = 0,965. \quad (3.3)$$

Таким образом, амплитудное значение первой гармоники МДС сравниваемых обмоток одинаково:

$$F_{m_1} = \frac{\sqrt{2} A \tau k_{об}}{\pi}.$$

В отношении расхода меди обмотки с полным заполнением пазы имеют более короткие лобовые части и, следовательно, выгоднее для узких машин. Обмотки с полузаполненными пазами целесообразнее применять в широких машинах, где основная часть расхода меди определяется длиной пазовой части.

**Свойства двухслойных одноплоскостных концентрических обмоток с полузаполненными пазами с полным и укороченным шагом.** В технической литературе такой тип обмоток не рассматривался.

По этой причине приведем некоторые частные результаты, полученные в [7, 8] при проектировании МГД-насоса для жидкого магния, для которого использовались обмотки этого типа.

Применение одноплоскостных концентрических обмоток диктовалось высокой температурой канала с жидким металлом (750 °С), расположенным между двумя индукторами ЛИМ.

Сопоставление вариантов проводилось при следующих условиях:

- одинаковой длине индуктора (обусловленной техническим заданием) и одинаковым числом пар полюсов  $2p = 2$ ;
- одинаковой ширине индуктора и вторичного элемента (ВЭ);
- фиксированном значении фактора нагрева  $AJ$  (равенстве потерь в обмотке) [9]:

$$AJ = A \cdot J,$$

где  $A$  — линейная нагрузка машины (А/м);  $J$  — плотность тока проводника обмотки (А/мм<sup>2</sup>);

- линейная нагрузка  $A$  и плотность тока  $J$  сопоставляемых вариантов определялись без учета толщины катушечной изоляции;
- критерием оптимальности принималась величина тягового усилия  $F$  с учетом ограничения по степени насыщения магнитопровода.

В качестве базового варианта принималась шестизонная шаблонная двухслойная обмотка с полным шагом (рис. 3.41, *a*).

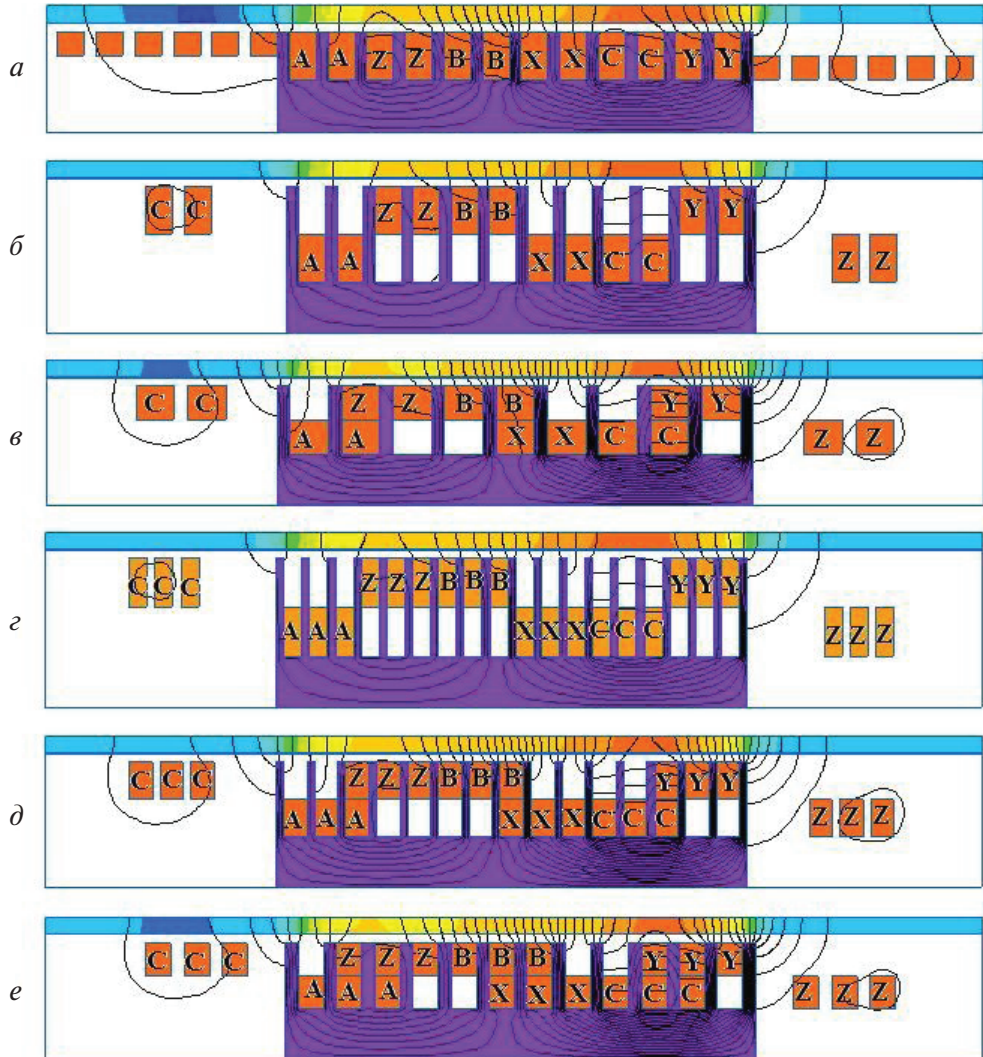


Рис. 3.41. Геометрия сравниваемых машин

С базовым вариантом сравнивались машины с шестизонными двухслойными одноплоскостными обмотками при  $q = 2,3$  и  $\beta = 1 \div 2/3$  (рис. 3.41, *б–е*).

В программе Elcut [10] была создана расчетная модель для сравнения, учитывающая в двумерной постановке продольный краевой эф-

фект. Для учета поперечного краевого эффекта вносилась поправка в электропроводность вторичного элемента [5].

Результаты расчетов приведены в табл. 3.1. Здесь видно, что снижение относительного шага обмоток  $\beta$  снижает величину тягового усилия  $F$ .

Таблица 3.1

**Сравнение вариантов индукторов ЛИМ с различными обмотками**

Рисунок	Относительный шаг $\beta$	Число пазов на полюс и фазу	Число пазов	Максимальная индукция в зубце, Тл	Плотность тока проводника обмотки (А/мм <sup>2</sup> )	Линейная нагрузка А/м	Усилие, Н
3.41, а	1	2	12	0,88	1,76	46,8	81,2
3.41, б	1	2	12	1,37	1,76	46,8	70,5
3.41, в	3/4,5	2	9	1,11	1,76	46,8	59,2
3.41, г	1	3	18	1,83	1,76	46,8	72,8
3.41, д	5/7,5	3	15	1,49	1,76	46,2	63,8
3.41, е	2/3	3	12	1,05	1,76	46,2	55,5

Однако магнитопроводы обмоток с полным шагом приходится выполнять с очень узкими и высокими зубцами, что приводит к повышенным значениям индукции у основания зубца и создает технологические трудности изготовления таких магнитопроводов.

В этом отношении наилучшими являются обмотки с  $q = 2$  и  $\beta = 3/4,5 = 0,67$  (рис. 3.41, в) и с  $q = 3$  и  $\beta = 2/3 = 0,67$  (рис. 3.41, е). Поскольку индуктор с  $q = 2$  имеет 9 зубцов, а с  $q = 3$ —15 зубцов, то окончательный выбор был сделан в пользу варианта с  $q = 2$ .

Сравнение базового варианта с выбранным показывает снижение усилия в последнем случае на 27 %. Более подробный анализ свойств двухслойных одноплоскостных обмоток с учетом толщины изоляции приведен в [7, 8].

### 3.5. Кольцевые обмотки ЛИМ

**Особенности кольцевых обмоток.** В настоящее время кольцевые (граммовские) обмотки для круговых машин переменного тока не применяются. Однако для ЛИМ эти обмотки обладают рядом несомненных преимуществ.



Во-первых, это высокая технологичность: все катушки имеют одинаковую и наиболее простую плоскую форму, т.е. относятся к классу шаблонных.

Во-вторых, применение кольцевых обмоток в линейных индукторах с несколькими магнитопроводами дает существенное снижение расхода меди за счет сокращения длины лобовых частей.

В-третьих, существует возможность получения нескольких значений полюсного деления (числа пар полюсов) на одном и том же индукторе. Такая возможность особенно ценна при проведении экспериментальных исследований.

**Виды кольцевых обмоток.** Кольцевые обмотки можно разделить на два типа:

- *кольцевые внешние*, в которых катушка охватывает ярмо магнитопровода (рис. 3.42, а, б);
- *кольцевые внутренние*, в которых катушка охвачена ярмами нескольких магнитопроводов (рис. 3.42, в, г).

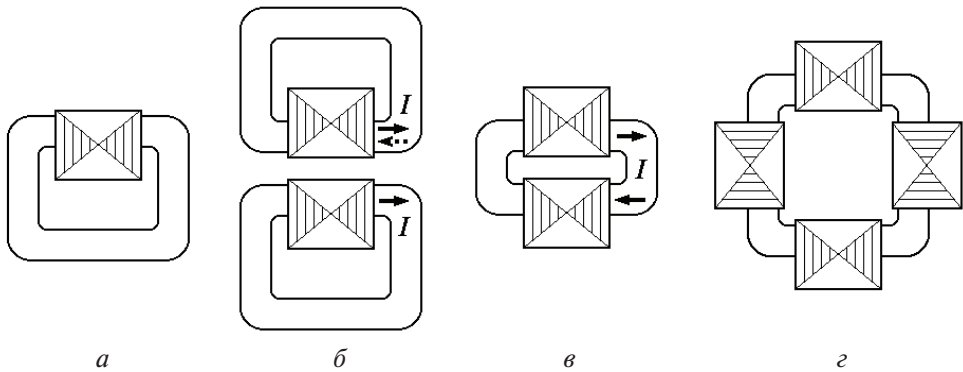


Рис. 3.42. Кольцевые обмотки:  
а, б — внешние; в, г — внутренние

Как следует из сопоставления этих обмоток на рис. 3.42, б и рис. 3.40, в, для индукторов с несколькими магнитопроводами внешние кольцевые обмотки требуют значительно большего расхода обмоточного провода по сравнению с внутренними. Однако, в отличие от внутренних кольцевых обмоток, способных создавать только магнитные поля встречного направления, внешние позволяют получать как встречное, так и согласное направление магнитных потоков в зазоре (рис. 3.43).

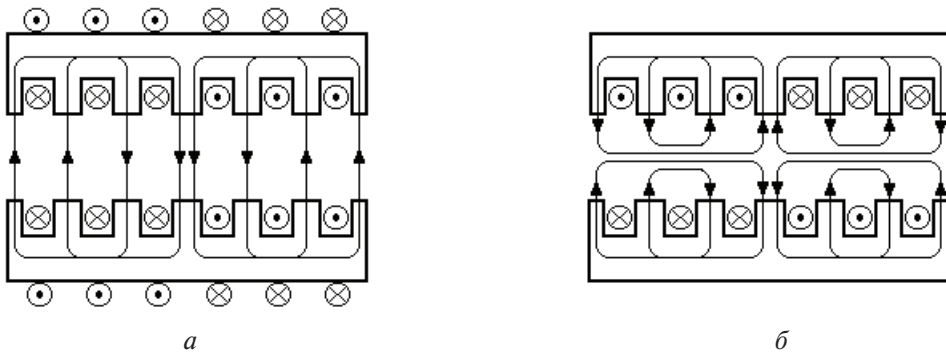


Рис. 3.43. Направления магнитных потоков в зазоре ЛИМ:

а) согласное; б) встречное

**Области применения.** Наиболее широкая (но не единственная) область применения ЛИМ с кольцевыми обмотками — устройства для бесконтактного (без механического воздействия внешних движущихся частей) перемешивания жидких металлов.

Конструкция ЛИМ с кольцевыми внутренними обмотками с несколькими магнитопроводами (рис. 3.42, в, г) позволяет приспособиться к форме сечения создаваемого слитка — вытянутого прямоугольного, квадратного или круглого. Здесь усилия, действующие на жидкий металл, сосредоточены в узком приповерхностном слое и создают однонаправленное движение вдоль внешней поверхности жидкой фазы и, в силу возникающего гидростатического давления, движение обратного направления в середине сечения металла (рис. 3.44, а).

Двусторонний индуктор с внешними кольцевыми обмотками в плоском тигле позволяет создавать как двухконтурную циркуляцию металла (подобно индуктору с внутренними обмотками), так и более сложные пути движения металла — одноконтурное движение (рис. 3.44, б), «восьмерку» при создании сбегающих и разбегающих полей (рис. 3.44, б) и т.д. На рис. 3.45 приведены расчетные распределения полей скоростей жидкого металла, соответствующие рис. 3.44 [9].

В качестве примера гибкости кольцевых обмоток ниже приведены некоторые возможные схемы обмоток одного и того же индуктора с 12 катушками (рис. 3.46, 3.47). На таком индукторе можно получить пять различных машин — две с шестизонными обмотками ( $2p = 2, 4$ ) и три с трехзонными ( $2p = 2, 4, 8$ ).



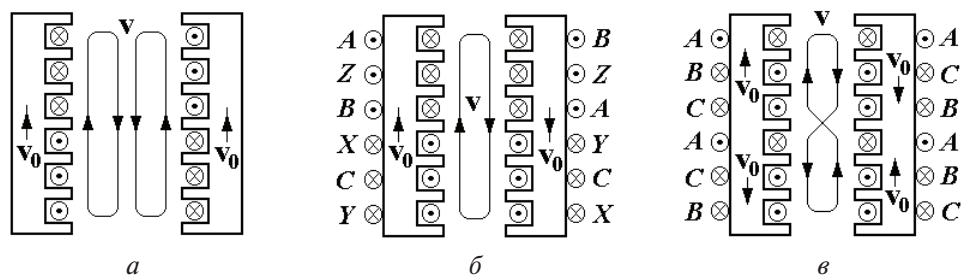


Рис. 3.44. Схема движения жидкого металла в индукторах ЛИМ

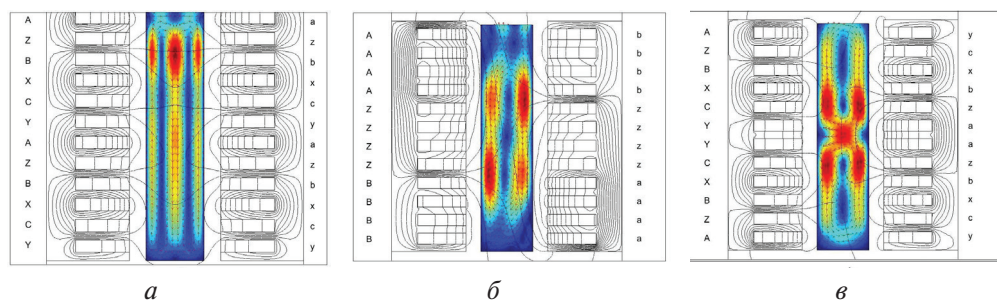
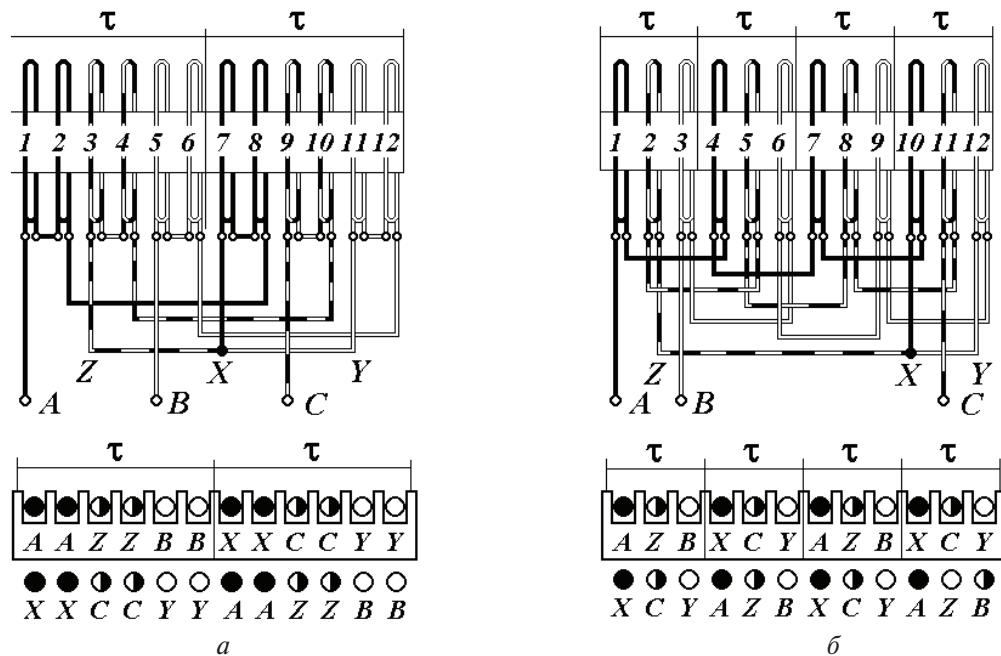


Рис. 3.45. Расчетные распределения скоростей в жидком металле

Рис. 3.46. Шестизонные кольцевые обмотки ( $Z = 12$ ):а)  $2p = 2, q = 2$ ; б)  $2p = 4, q = 1$

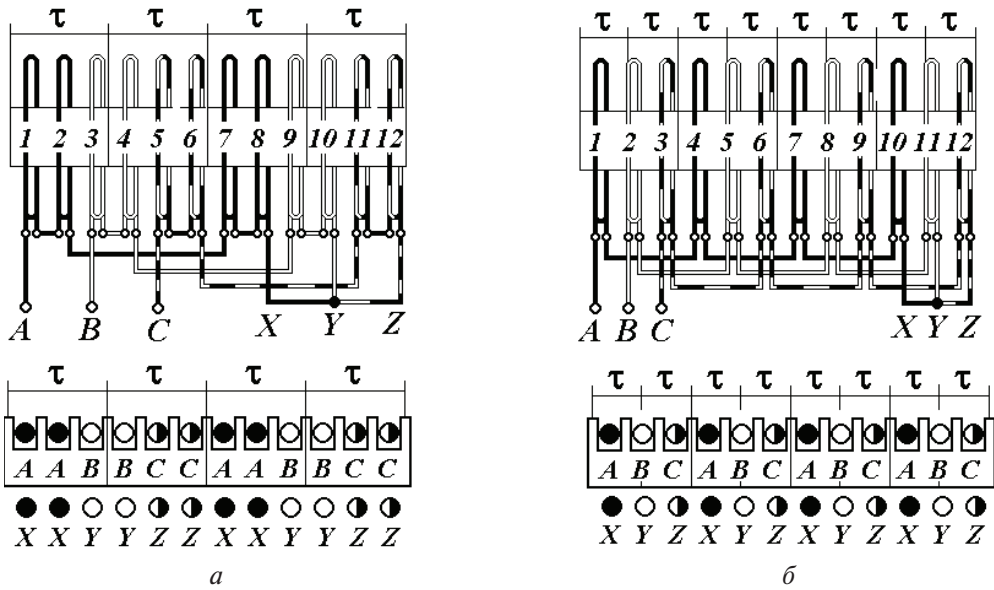


Рис. 3.47. Трехзонные кольцевые обмотки ( $Z=12$ ):

а)  $2p=4, q=2$ ; б)  $2p=8, q=1$

Одна из возможных конструкций ЛИМ с кольцевыми обмотками приведена на рис. 3.48—3.49.

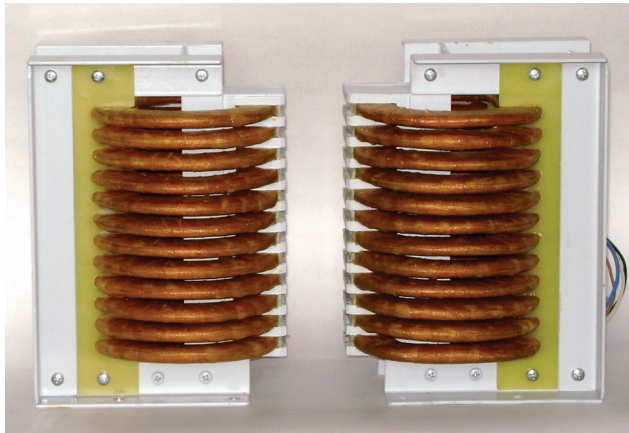


Рис. 3.48. Двусторонний индуктор ЛИМ с кольцевой обмоткой ( $Z=12$ )

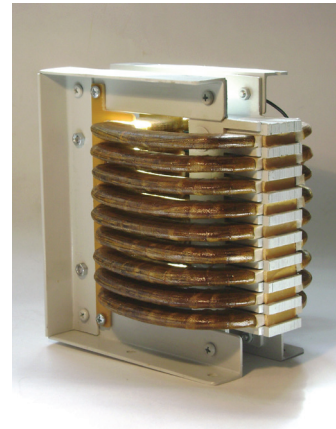


Рис. 3.49. Индуктор ЛИМ с кольцевой обмоткой ( $Z=9$ )

### 3.6. Особенности обмоток ЛИМ с разбегающимися и сбегающимися магнитными полями

**Области применения.** Ряд применений ЛИМ требует одновременного получения разнонаправленных бегущих магнитных полей:

1. МГД-устройства для перемешивания жидких металлов (как было показано в предыдущем параграфе, такие обмотки позволяют создавать сложные траектории движения металла).

2. Электродинамические сепараторы — устройства для извлечения или сортировки лома цветных металлов [10].

Принцип работы этих устройств подобен принципу работы линейных асинхронных двигателей. При этом роль якоря таких ЛИМ выполняют извлекаемые из сепарируемых смесей сплошные проводящие предметы.

Типичная конструкция электродинамического сепаратора представляет собой транспортер, под лентой которого установлен линейный индуктор (рис. 3.50, а). Направление движения магнитного поля (движения извлекаемых частиц) перпендикулярно направлению движения ленты транспортера. Очевидным недостатком такой конструкции является существенная неравномерность степени извлечения полезного продукта по ширине ленты транспортера. Действительно, извлекаемой частице, лежащей на стороне ленты, противоположной к приемному бункеру, приходится проходить больший путь, испытывая сопротивление сепарируемой смеси.

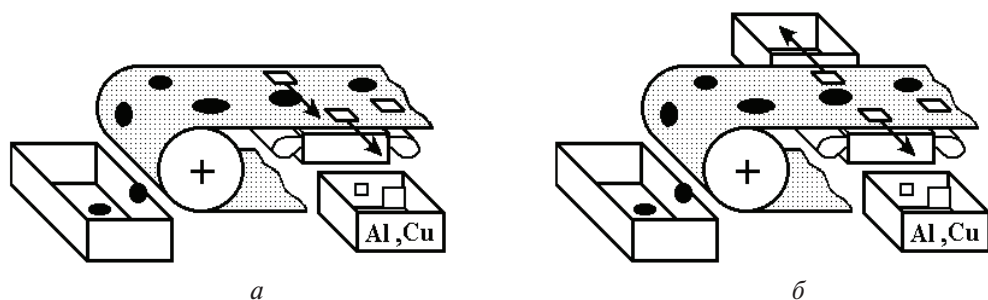


Рис. 3.50. Конструкции электродинамических сепараторов

Этот недостаток устраняется применением сепараторов с двухсторонним выходом, в котором усилия извлечения направлены от середины ленты к краям (рис. 3.50, б).

3. Поточные установки для индукционного нагрева стальных листов. Здесь применение индукторов ЛИМ с встречно бегущими полями позволяет совместить в одном устройстве две функции — движение и нагрев обрабатываемого изделия.

Такое устройство можно представить как обычную ИМ, работающую в условиях близких, но не равных значений токов прямой и обратной последовательностей. В таком режиме усилия, создаваемые этими составляющими токов, направлены встречно, что приводит к крайне низким скоростям движения — или высоким величинам скольжения  $s$ . Поскольку потери в якоре ИМ пропорциональны скольжению  $\Delta p \approx s$ , то такая ЛИМ совмещает в себе функции электромеханического и электротермического преобразователей энергии с преобладанием тепловой энергии над механической.

**Особенности построения обмоток с разбегающимися и сбегающимися полями.** Теоретическая возможность построения индуктора ЛИМ с двумя взаимно противоположными направлениями движения магнитного поля основывается на общеизвестном положении теории ИМ, согласно которому направление движения поля определяется порядком чередования фаз обмотки индуктора. Соответственно, электромагнитная часть такого сепаратора может быть выполнена в виде совмещенного индуктора ЛИМ с общим магнитопроводом и обмоткой, разделенной на два плеча (две параллельные или последовательные ветви), которые также соединяются между собой с различным чередованием фаз. В то же время, построение таких ЛИМ имеет следующие особенности [11].

Первая особенность состоит в появлении ряда ограничений на значения числа полюсов  $p$  и числа пазов на полюс-фазу  $q$  барабанных обмоток с разбегающимися полями. Действительно, для создания симметричных разнонаправленных усилий такая обмотка должна образовывать два одинаковых плеча (две параллельные или последовательные ветви), уложенные на двух равных по длине половинах общего магнитопровода.

Следовательно, число катушек фазы  $N_{\text{кф}}$  такой обмотки должно быть четным. Такому условию соответствуют следующие типы трехфазных барабанных петлевых обмоток:

- однослойные ( $N_{\text{кф}} = pq$ ) для разъемных статоров (без свободных сторон) с числом полюсов, кратным четырем —  $2p = 4, 8, 12, \dots$ , с любым числом пазов на полюс-фазу —  $q = 1, 2, 3, \dots$  (рис. 3.51, а);

- двухслойные с четным числом полюсов ( $N_{\text{кф}} = (2p - 1)q$ ), кратным четырем —  $2p = 4, 8, 12, \dots$ , только при четном числе пазов на полюс-фазу —  $q = 2, 4, 6, \dots$  (рис. 3.51, б).
- двухслойные с нечетным числом полюсов ( $N_{\text{кф}} = (2p - 1)q$ ), начиная с пяти —  $2p = 5, 7, 9, \dots$ , с любым числом пазов на полюс-фазу —  $q = 1, 2, 3, \dots$  (рис. 3.51, в).

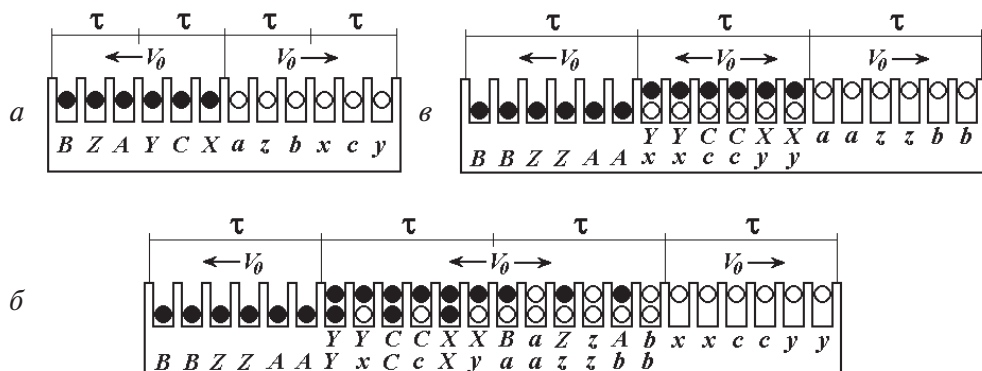


Рис. 3.51. Построение обмоток с разбегающимися магнитными полями

Вторая особенность состоит в том, что объединение магнитной цепи (размещение в общем магнитопроводе) двух плеч обмотки с различным чередованием фаз приводит к появлению области наложения встречно движущихся магнитных полей и, как следствие, возникновению в этой области пульсирующего поля — не создающего усилия извлечения. Это обстоятельство обуславливает появление «мертвой» зоны в середине индуктора, где тяговое усилие отсутствует или значительно ослаблено (рис. 3.51, б, в).

Третья особенность определяется исходным способом создания разбегающихся полей — созданием различных последовательностей чередования фазных зон в правом и левом плечах обмотки — и состоит в усложнении структуры обмотки совмещенного индуктора и увеличении возможных видов соединений частей обмотки между собой.

Ввиду несимметрии магнитной цепи ЛИМ различные схемы соединений параллельных ветвей должны иметь различные свойства, прежде всего отличаться величинами фазных токов и характером распределения магнитного поля по длине индуктора. При этом возможны три схемы соединения параллельных ветвей обмотки:

- выводы входных фаз параллельных ветвей обмотки объединены, средних и выходных — перекрещены (рис. 3.52, *а*);
- выводы средних фаз параллельных ветвей обмотки объединены, входные и выходные — перекрещены (рис. 3.52, *б*);
- выводы выходных фаз параллельных ветвей обмотки объединены, средние и входные — перекрещены (рис. 3.52, *в*).

Отметим, что схемы по рис. 3.52, *а, в* должны создавать несимметричное распределение магнитного поля по длине машины, а схема по рис. 3.52, *б* с объединенной средней фазой [4] — симметричное.

В конструктивном отношении это обстоятельство значительно увеличивает количество вариантов конкретного исполнения обмотки совмещенного индуктора ЛИМ, поскольку наряду с такими структурами обмотки (и типами их соединений между собой), как ветвь (с последовательным или параллельным соединением катушек), фаза (с соединениями «звезда» или «треугольник»), появляется еще одна — плечо (с симметричным или несимметричным соединением).

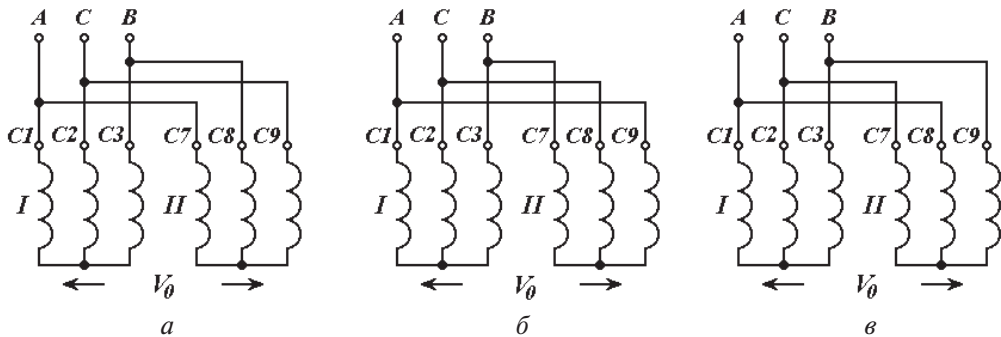


Рис. 3.52. Возможные схемы соединения плеч обмоток индукторов ЛИМ с разбегающимися магнитными полями

Влияние симметричного или несимметричного соединения плеч обмоток с встречно бегущими полями на характер пространственного распределения магнитного поля проверялось экспериментально на двух индукторах с барабанными обмотками — однослойной и двухслойной, схемы которых приведены на рис. 3.53 [12]. Огибающие магнитного поля для этих индукторов приведены на рис. 3.54, 3.55 [12]. Как видно из приведенных распределений огибающих индукции, симметричное соединение плеч обмоток дает симметричное распределение индукции, и наоборот.

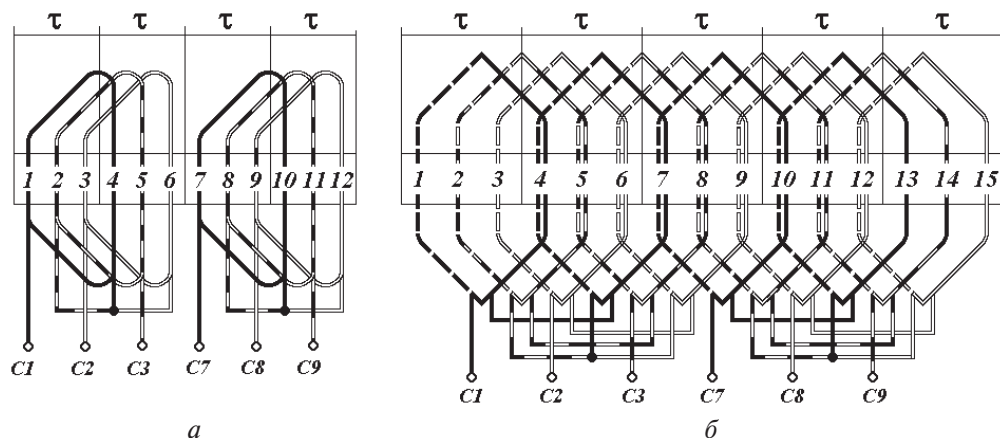


Рис. 3.53. Схемы обмоток индукторов с разбегающимися магнитными полями: а) однослойная ( $2p = 4$ ); б) двухслойная ( $2p = 5$ )

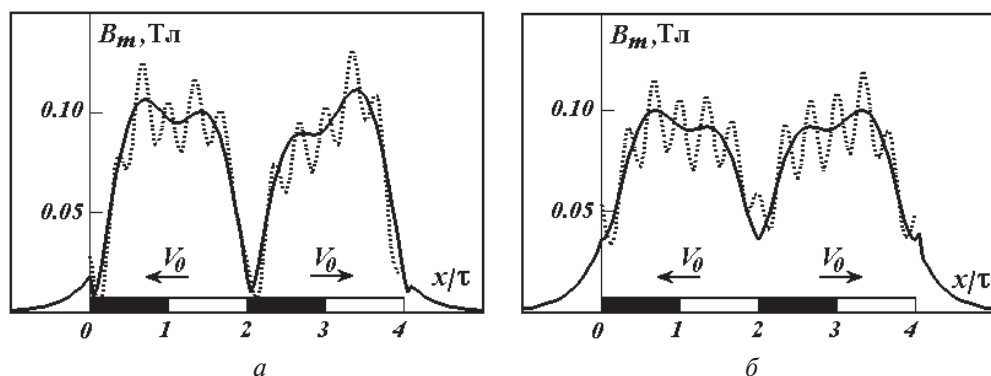


Рис. 3.54. Огибающие магнитного поля ЛИМ с однослойной обмоткой: а) по рис. 3.52, а; б) по рис. 3.52, б; сплошные линии — расчет, пунктирные — эксперимент

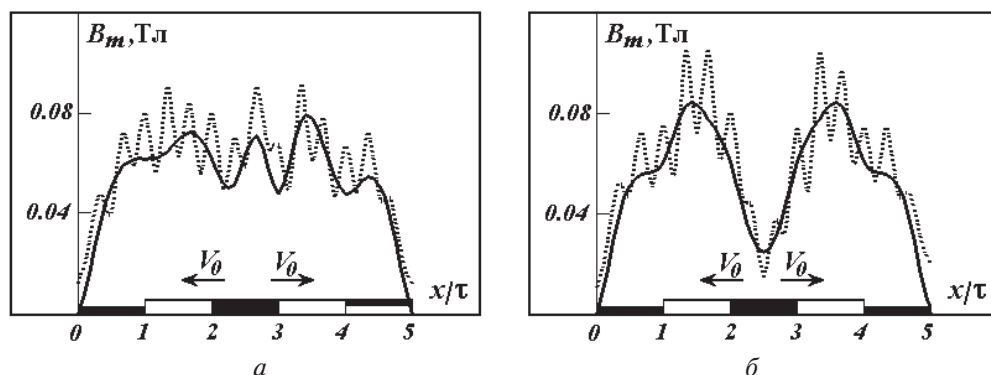


Рис. 3.55. Огибающие магнитного поля ЛИМ с двухслойной обмоткой: а) по рис. 3.52, а; б) по рис. 3.52, б; сплошные линии — расчет, пунктирные — эксперимент



---

## Список библиографических ссылок

---

1. Попов В. И., Ахунов Т. А., Макаров Л. Н. Современные асинхронные электрические машины: новая российская серия РА. М. : Знак, 1999. 256 с.
2. Вольдек А. И. Электрические машины. Л. : Энергия, 1978. 832 с.
3. Радин В. И., Брускин Д. Э., Зорохович А. Е. Электрические машины: Асинхронные машины : учеб. для электромех. спец. вузов / под ред. И. П. Копылова. М. : Высшая школа, 1988. 328 с.
4. Обмотки электрических машин / В. И. Зимин [и др.]. Л. : Энергия, 1976. 488 с.
5. Вольдек А. И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л. : Энергия, 1970. 272 с.
6. Валдманис Я. Я., Лиелпелтер Я. Я. Структура магнитного поля в рабочем зазоре линейных МГД-машин при произвольном числе полюсов и конечной длине магнитопровода // Магнитная гидродинамика. 1967. № 1. С. 115–120.
7. Индукционный МГД-насос с плоскими катушками / Ф. Е. Тарасов [и др.] // Актуальные проблемы энергосберегающих технологий АПЭЭТ-2014 : сб. науч. трудов. Екатеринбург, 2014. С. 119–123.
8. Fedor E. Tarasov, Sergey Bychkov, Sergey L. Nazarov, Vasiliy E. Frizen. Induction MHD-pump with flat coils // Acta Technica (CSAV). 2015. Vol. 60, № 1. P. 71 –79.
9. Электромагнитное перемешивание расплавов с микрочастицами / С. Л. Назаров [и др.] // III Международная НТК «Электро-механические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы». Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2007. С. 207–210.



10. Коняев А. Ю., Коняев И. А., Назаров С. Л. Применение электродинамических сепараторов в технологиях вторичной цветной металлургии // Цветные металлы. 2012. № 11. С. 22–25.
11. Коняев А. Ю., Назаров С. Л. Особенности электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов с разбегающимися магнитными полями // Электротехника. 2013. № 3. С. 62–66.
12. Барашев Н. Р., Коняев А. Ю., Назаров С. Л. Исследование линейных индукторов с разбегающимися полями для электродинамических сепараторов // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы : сб. науч. трудов IV Международной науч.-техн. конф. Екатеринбург : УрФУ, 2011. С. 217–222, 349–352.

*Учебное издание*

**Бычков** Сергей Алексеевич  
**Назаров** Сергей Леонардович  
**Тарасов** Федор Евгеньевич  
**Фризен** Василий Эдуардович

**ОБМОТКИ  
ИНДУКЦИОННЫХ МАШИН  
ВРАЩАТЕЛЬНОГО И ПОСТУПАТЕЛЬНОГО  
ДВИЖЕНИЯ**

Редактор Т. Е. Мерц  
Верстка О. П. Игнатьевой

Подписано в печать 25.01.2017. Формат 70×100/16.  
Бумага писчая. Печать цифровая. Гарнитура Newton.  
Уч.-изд. л. 3,5. Усл. печ. л. 6,5. Тираж 100 экз.  
Заказ 37

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: 8(343)375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: 8(343) 350-56-64, 350-90-13  
Факс: 8(343) 358-93-06  
E-mail: press-urfu@mail.ru



